

ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



ITS  
chemical  
engineering

# UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO<sub>2</sub> SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT DIETANOLAMINA (DEA)

Disusun oleh:

Toto Iswanto (2311100026)

Muhammad Rifa'i (2311100187)

Dosen Pembimbing:

Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.

Dr. Ir. Susianto, DEA

LABORATORIUM PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA

SENIN, 22 JUNI 2015



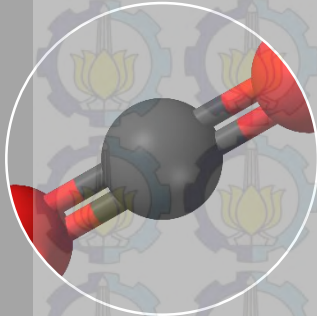
# OUTLINE



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



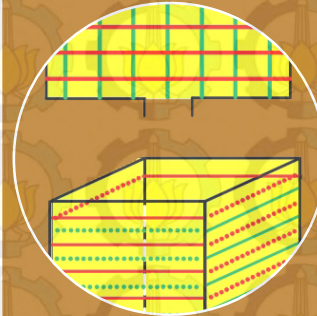
ITS  
chemical  
engineering



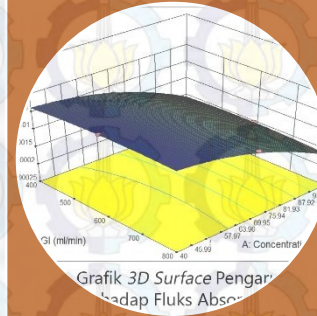
PENDAHULUAN



PENELITIAN  
TERDAHULU



METODE  
PENELITIAN



HASIL  
PENELITIAN



KESIMPULAN

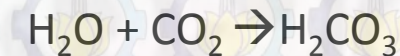


## CO<sub>2</sub> dalam gas alam harus dihilangkan!

- **PENGOTOR**

- **KOROSIF**

CO<sub>2</sub> korosif jika di dalam gas alam terkandung uap air:

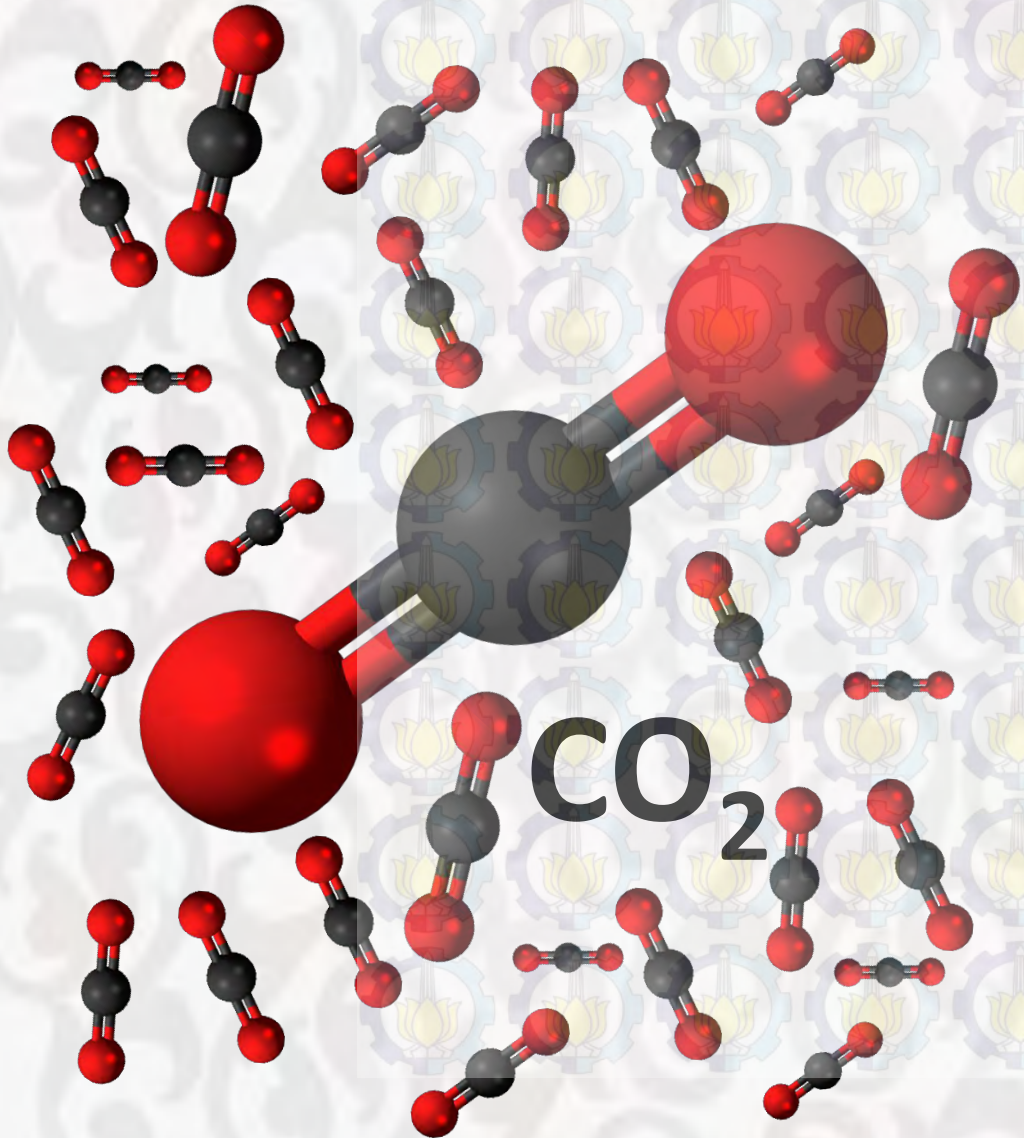


- **MENYEBABKAN PENURUNAN NILAI PANAS**

CO<sub>2</sub> tidak memiliki nilai panas sehingga menyebabkan terjadinya penurunan nilai panas (*heating value*) dan berkurangnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh turbin gas (Tolage, 2009).

- **MENYEBABKAN SUMBATAN PADA SALURAN PERPIPAAN**

Proses pencairan gas alam berjalan pada suhu sangat rendah, yaitu -161°C, sedangkan titik beku CO<sub>2</sub> sekitar -78,4°C (Perry & Green, 2008).



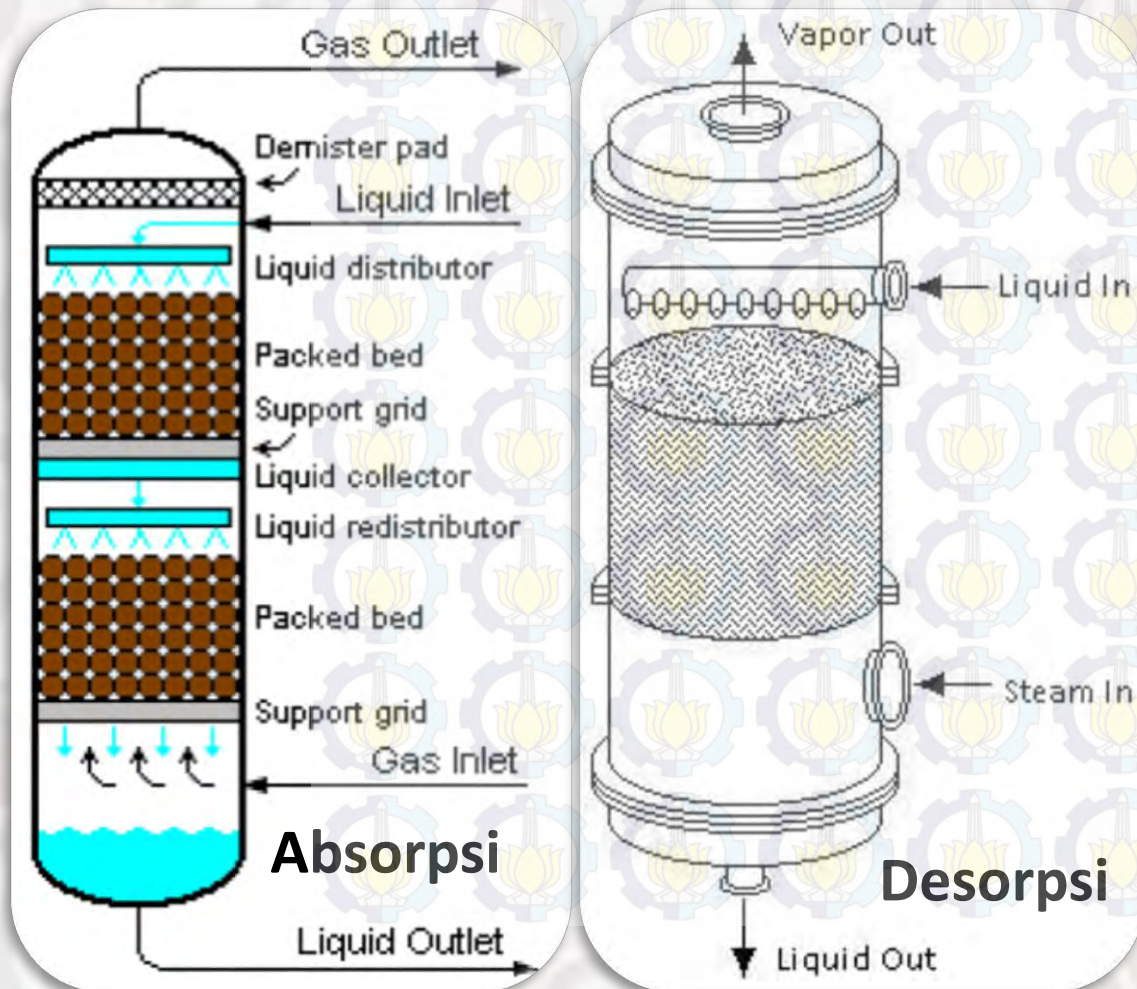


## PROSES PEMISAHAN CO<sub>2</sub>

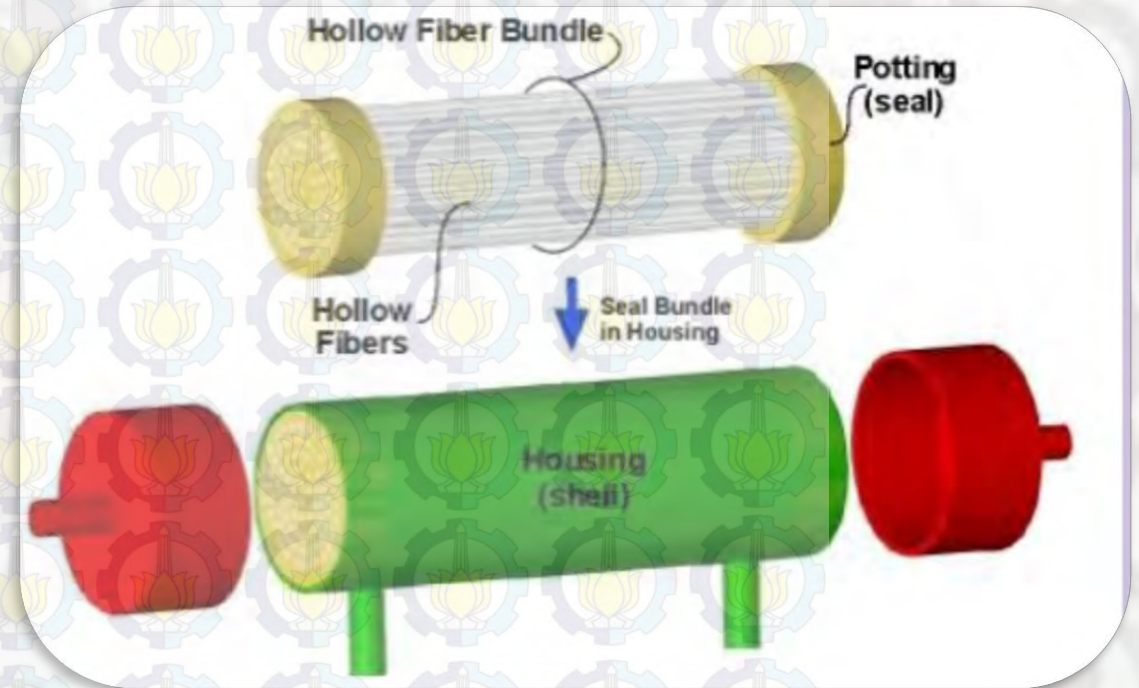
- **ABSORPSI SECARA FISIK DAN KIMIA**
- **ADSORPSI**
- ***CRYOGENIC***
- **PERMEASI MEMBRAN**



## Teknologi Konvensional (*Packed Column*)

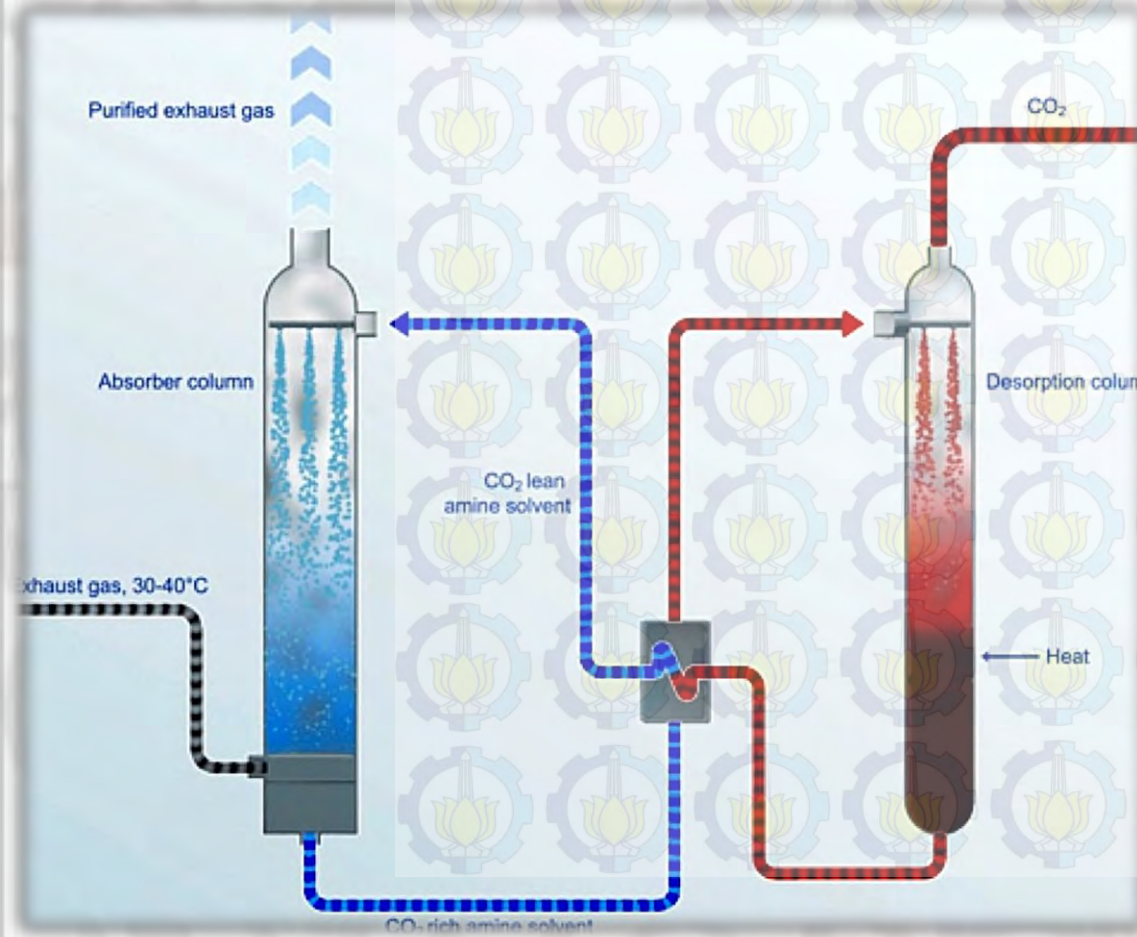


## Teknologi Kontaktor Membran





## Teknologi Konvensional (Kolom Absorpsi-Desorpsi)



Kontak langsung gas dan liquid dapat menyebabkan *channeling, flooding, foaming, dan entrainment*

Membutuhkan energi yang besar

Resiko kehilangan pelarut saat regenerasi besar

Rentan terhadap korosi

Memiliki luas kontak yang relatif kecil dengan ukuran alat yang besar

(Simioni dkk., 2011)



Laju alir salah satu komponen independen terhadap laju alir komponen lain sehingga bebas dari masalah *flooding, foaming, dan entrainment* (Hedayat dkk., 2011 ; Simioni dkk., 2011)

Dapat melakukan absorpsi dan desorpsi secara simultan dalam satu unit (Kumazawa, 2000)

Mudah untuk di *scale up*, ukurannya 10 kali lebih kecil dari pada *packed tower* (Gabelman & Hwang, 1999)

Luas area kontak 4-30 kali lebih besar dibanding luas area kontak kolom konvensional (Simioni dkk., 2011)

## Teknologi Penyerapan Kontaktor Membran





# PENELITIAN TERDAHULU



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



Material/Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
PP (Polipropilena)/ simultan dalam satu modul	Memodelkan dan mengukur permeabilitas dan faktor pemisahan melalui membran tidak membutuhkan cair untuk sistem CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> melalui berbagai energi eksternal. tekanan parsial CO <sub>2</sub> . Mereka menggunakan pendekatan <i>immobilized liquid membrane</i> dengan pelarut dietanolamina (DEA). Dalam sistem ini, DEA diamobilisasi dalam pori-pori membran PP mikro hidrofobik, dan gas helium digunakan sebagai <i>sweep gas</i> .	Hasilnya model ini	Guha dkk. (1990)



# PENELITIAN TERDAHULU



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



Material/Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
<b>PTFE (Politetrafluoroetilena)/ simultan dalam satu modul</b>	Proses absorpsi-desorpsi secara simultan dalam satu unit kontaktor membran dengan pelarut AMP ( <i>Amino Methyl Propanol</i> ) dan MAE ( <i>Methyl Amino Ethanol</i> ). Percobaan dilakukan dalam satu tangki yang berisi pelarut dengan pengadukan untuk homogenitas pelarut.	Proses absorpsi-desorpsi secara simultan dapat berlangsung stabil hingga 20 jam.	Kumazawa (2000) dan Shimada dkk. (2006)
<b>PVDF (Polivinildenefluorid)/ simultan beda modul</b>	Mempelajari proses absorpsi dan desorpsi menggunakan modul membrane PVDF dengan CO <sub>2</sub> murni sebagai <i>feed gas</i> dan N <sub>2</sub> sebagai <i>sweep gas</i> serta NMP ( <i>N-Methyl Pyrrolidone</i> ) sebagai pelarut. Percobaan dilakukan dalam 2 modul berbeda, yaitu modul untuk absorpsi dan untuk desorpsi. Pelarut yang digunakan di modul absorpsi dikirim ke modul desorpsi untuk diregenerasi.	Fluks absorpsi lebih besar 10x dibanding fluks desorpsi. Untuk menaikkan fluks desorpsi, modul harus diperpanjang atau laju <i>sweep gas</i> diperkecil agar waktu kontak gas-liquid dapat lebih lama.	Mansourizadeh dkk. (2011)



## Variabel dan Hasil Penelitian Proses Absorpsi-Desorpsi dengan Kontaktor Membran

Proses	Membran	Pelarut	Gas Umpam	$Q_l$ (ml/min)	Desorpsi	Pemisahan (%)	Fluks (mol/m <sup>2</sup> .s)	Pustaka
Hibrid	PVDF	PZ: 2-10% TEA: 5-15% PZ + TEA	CO <sub>2</sub> : 10-40%	20	T: 80 – 110°C	absorpsi: > 95	absorpsi: 2,5.10 <sup>-4</sup> – 2.10 <sup>-3</sup>	Yeon dkk. (2004)
Hibrid (skala pilot)	PVDF	MEA: 5% TEA: 5%	CO <sub>2</sub> : 11%	600-1.800	T: 80 – 105°C	absorpsi: 95	-	Yeon dkk. (2005)
Simultan dalam satu modul	PTFE	MAE: 0,5-2 M	CO <sub>2</sub> : 5-20%	batch	aliran N <sub>2</sub> T: 30°C P: 1 atm	-	laju absorpsi 10,9-12,9 > laju desorpsi	Shimada dkk. (2006)
Simultan dalam satu modul	PTFE	AMP: 0,5-2 M	CO <sub>2</sub> : 5-20%	batch	aliran N <sub>2</sub> T: 30°C P: 1 atm	-	absorpsi- desorpsi: 10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-7</sup>	Kumazawa (2000)



# PENELITIAN TERDAHULU



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



(lanjutan)

Proses	Membran	Pelarut	Gas masuk	$Q_i$ (ml/min)	Desorpsi	Pemisahan (%)	Fluks (mol/m <sup>2</sup> .s)	Pustaka
Hibrid	PP	CORAL: 2 M	CO <sub>2</sub> : 0,05-10%	8-300	T: 105°C	-	absorpsi: 0,22 mol/m <sup>2</sup> .s	Feron dkk. (2002)
Hibrid	PP	MEA & MDEA: 0,5-3 M	-	0,025-0,1 m/s	-	absorpsi: 90	absorpsi: 8,89.10 <sup>-4</sup> mol/m <sup>2</sup> .s	Yan dkk. (2007)
Simultan beda modul	PVDF	Air	CO <sub>2</sub> murni	50-200	aliran N <sub>2</sub> T: 26-60°C	desorpsi: < 30	absorpsi: 8,5.10 <sup>-4</sup> desorpsi: 3,0.10 <sup>-8</sup>	Mansourizadeh dkk. (2011)



1. Penelitian proses absorpsi-desorpsi  $\text{CO}_2$  secara simultan menggunakan satu modul kontaktor membran menyilang ganda belum banyak.
2. Kandungan gas  $\text{CO}_2$  pada gas alam ada yang mencapai 30-60% volume (seperti gas alam Natuna), sedangkan penelitian pada kontaktor membran sebelumnya menggunakan konsentrasi  $\text{CO}_2$  0,05-30%.



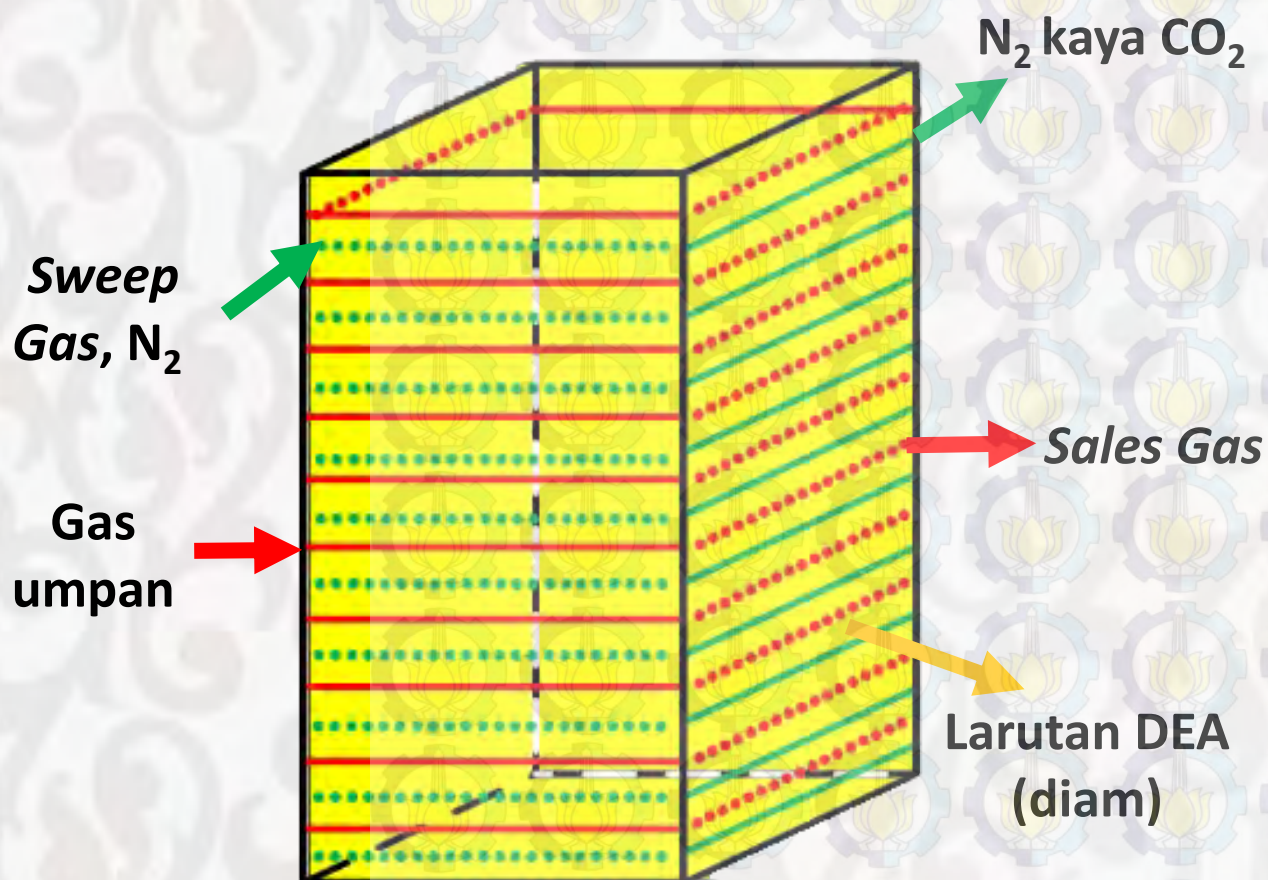
1. Mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi  $\text{CO}_2$ , laju alir gas  $\text{CO}_2$  (gas umpan), dan laju alir gas  $\text{N}_2$  (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan  $\text{CO}_2$  dalam modul kontaktor membran menyilang ganda dengan konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  yang tinggi.
2. Melakukan uji kinerja kontaktor membran secara kontinu selama 8 jam untuk mengetahui besar fluks absorpsi dan desorpsi  $\text{CO}_2$  serta efisiensi pemisahannya.



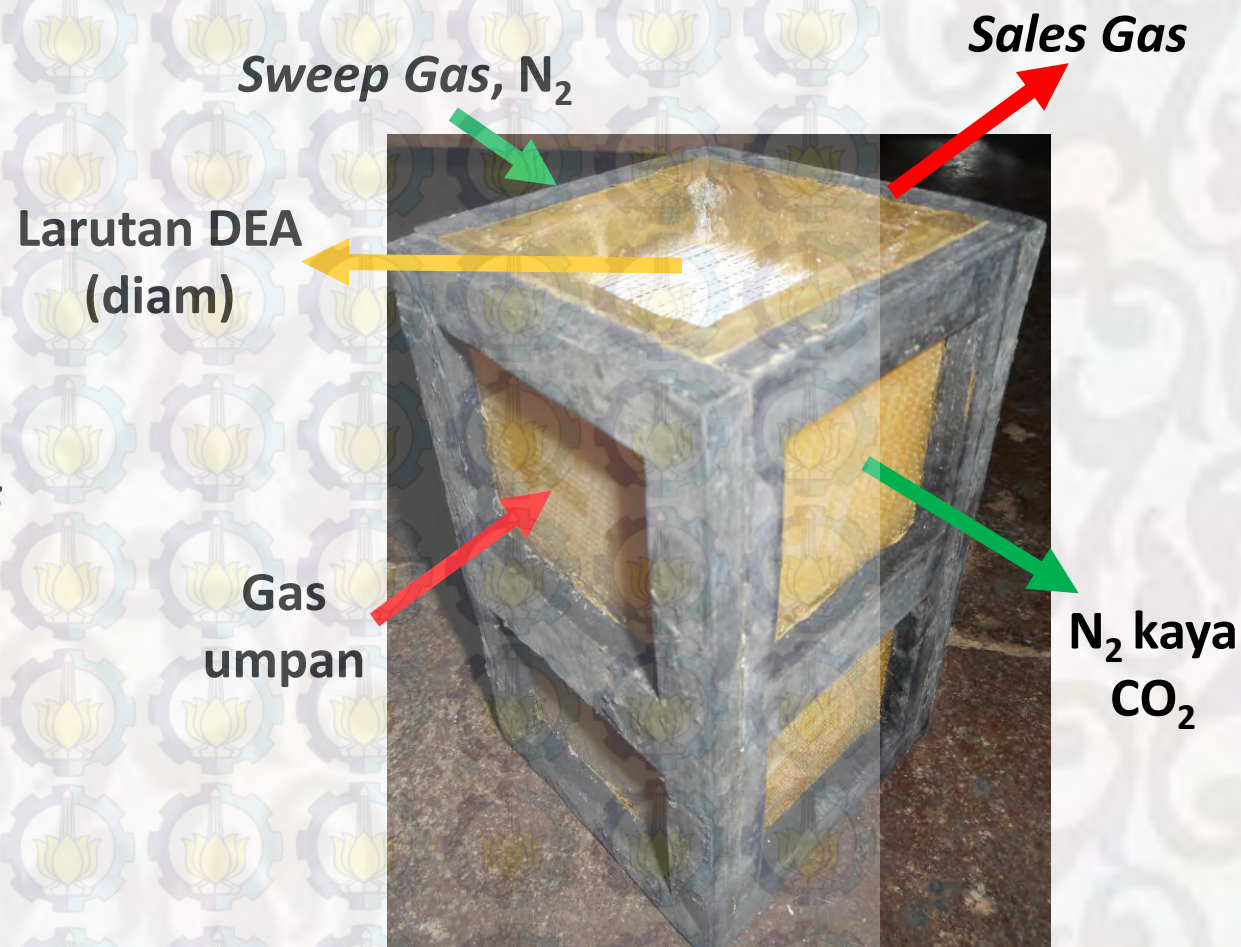
# KONSEP KONTAKTOR MEMBRAN



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



Modul Kontaktor Membran Tampak Samping  
(Konsep)



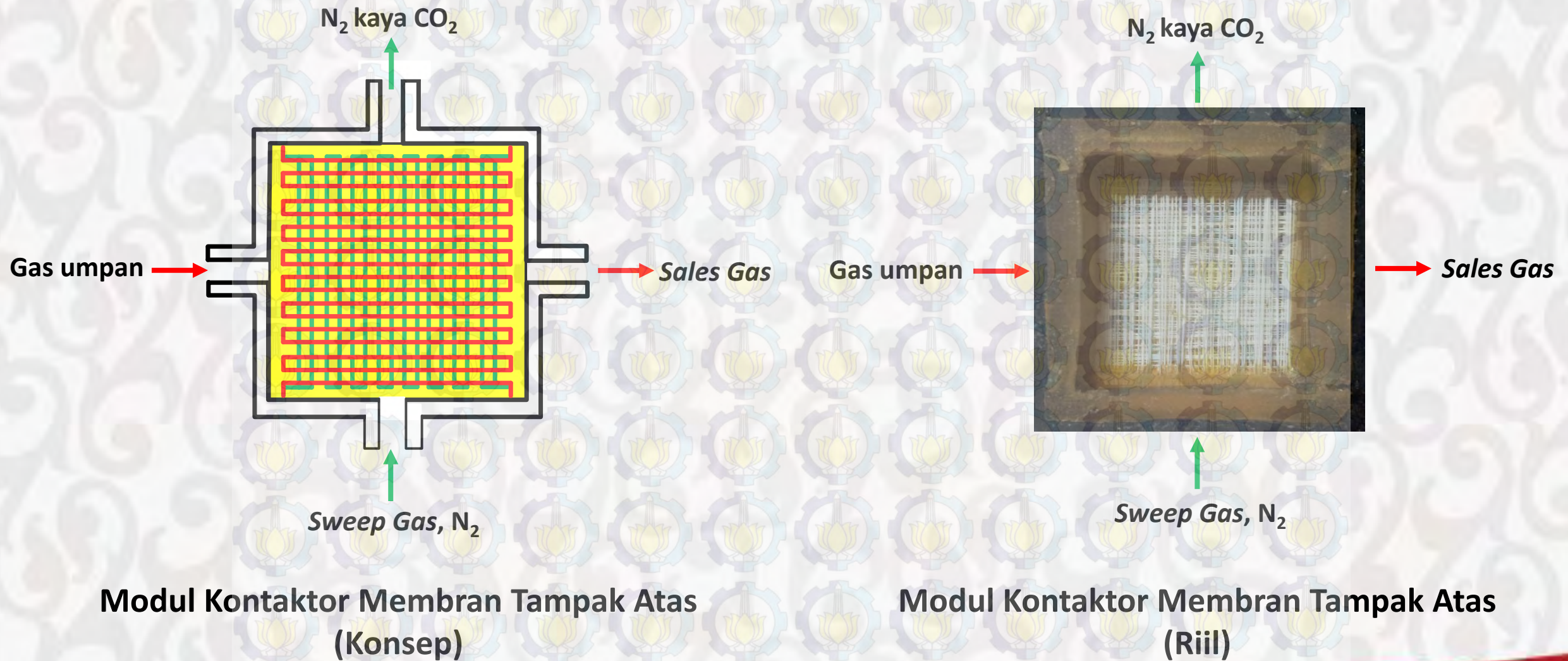
Modul Kontaktor Membran Tampak Samping  
(Riil)



# KONSEP KONTAKTOR MEMBRAN



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember





1. Membran kontaktor di dalam modul membran yang disusun menyilang ganda terbuat dari fiber polipropilena (PP).
2. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi  $\text{CO}_2$  adalah dietanolamina (DEA) yang dioperasikan secara *diam/batch*, sedangkan untuk proses desorpsi  $\text{CO}_2$  menggunakan  $\text{N}_2$  sebagai *sweep gas*.
3. Gas umpan terdiri dari gas  $\text{CO}_2$  dan gas  $\text{N}_2$  yang komposisinya disesuaikan variabel penelitian.



Hasil penelitian ini diharapkan mampu untuk mengetahui pengaruh parameter operasi terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO<sub>2</sub> dalam modul kontaktor membran secara simultan sehingga **dapat dijadikan referensi atau rujukan dalam pengaplikasian kontaktor membran simultan menyilang ganda di industri yang berkaitan dengan gas alam.**



# METODOLOGI PENELITIAN

## Bahan yang Digunakan:

1. Gas umpan dengan konsentrasi  $\text{CO}_2$  40% dan 99,5% volume, *balance*  $\text{N}_2$ .
2. Gas  $\text{N}_2$  dengan konsentrasi 99,95% volume *balance*  $\text{O}_2$ .
3. Fiber membran polipropilena (PP).
4. Pelarut dietanolamina (DEA) 30% berat.

## Data Karakteristik Membran Polipropilena

Parameter	Nilai
Diameter dalam ( $d_i$ ) (mm)	0,35
Diameter luar ( $d_o$ ) (mm)	0,5
Diameter pori ( $d_p$ ) ( $\mu\text{m}$ )	0,2
Panjang fiber (mm)	83
Jumlah fiber	2.500
Jumlah lapisan	25
Luas kontak gas-cairan ( $\text{m}^2$ )	21,195
Porositas	0,65

## Variabel

### Variabel tetap:

1. Konsentrasi pelarut DEA (30% berat).

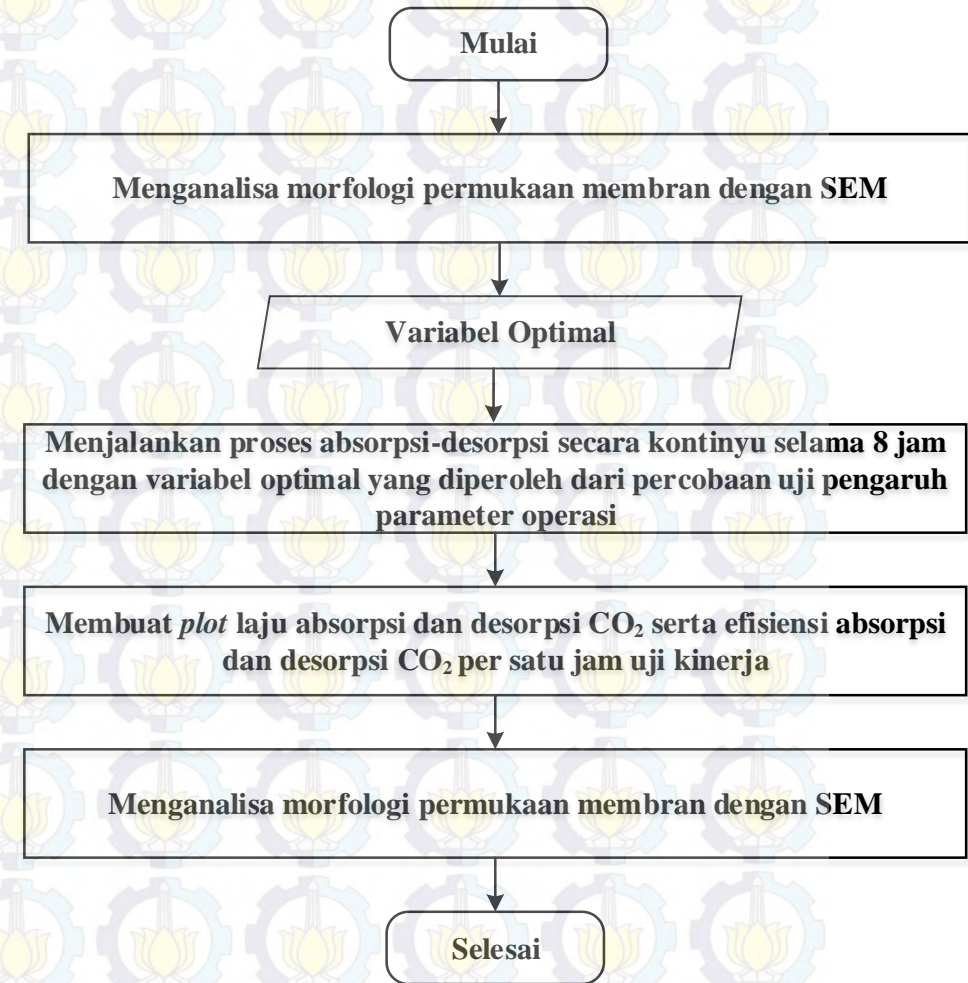
### Variabel berubah:

1. Konsentrasi  $\text{CO}_2$  dalam gas umpan: 40% dan 99,5% volume.
2. Laju alir gas umpan : 400 – 800 ml/min.
3. Laju alir gas  $\text{N}_2$  (*sweep gas*): 400, 600, dan 800 ml/min.

### Variabel respon:

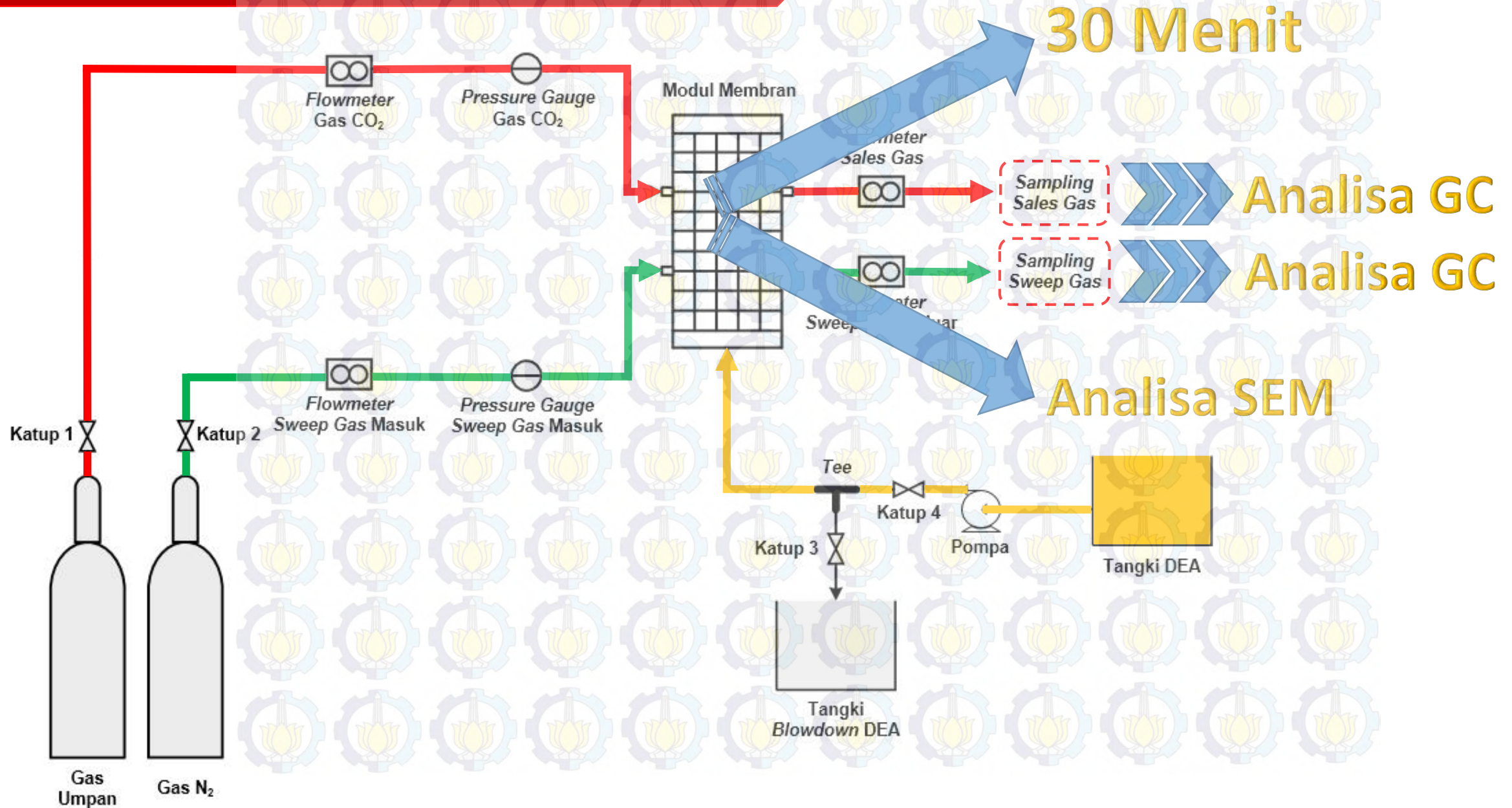
1. Laju perpindahan massa (fluks) absorpsi  $\text{CO}_2$ .
2. Laju perpindahan massa (fluks) desorpsi  $\text{CO}_2$ .
3. Efisiensi absorpsi  $\text{CO}_2$ .
4. Efisiensi desorpsi  $\text{CO}_2$ .
5.  $\text{CO}_2$  loading pelarut.







# RANGKAIAN ALAT PENELITIAN





# ANALISA HASIL



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



## Fluks Absorpsi

$$J_{CO_2 (absorpsi)} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}) \times 273,15}{0,0224 \times T_g \times S}$$

## Fluks Desorpsi

$$J'_{CO_2} = \frac{(V_{out} \times K_{out}) \times 273,15}{0,0224 \times T_g \times S}$$

## Efisiensi Absorpsi

$$\eta = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\%$$

## Efisiensi Desorpsi

$$\eta' = \frac{V_{out} \times K_{out}}{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}} \times 100\%$$

## CO<sub>2</sub> Loading

$$CO_2 \text{ loading} = \frac{Q_{in} \times C_{in} - (Q_{out} \times C_{out} + V_{out} \times K_{out})}{n_{DEA}} \times 0,001$$

di mana di mana  $J_{CO_2}$  adalah fluks absorpsi (mol/m<sup>2</sup>.s),  $J'_{CO_2}$  adalah fluks desorpsi (mol/m<sup>2</sup>.s),  $\eta$  adalah efisiensi absorpsi (%),  $\eta'$  adalah efisiensi desorpsi (%),  $Q_{in}$  dan  $Q_{out}$  adalah laju alir gas umpan dan laju alir *sales gas* (m<sup>3</sup>/jam),  $V_{out}$  adalah laju alir gas N<sub>2</sub> (*sweep gas*) keluar (m<sup>3</sup>/jam),  $C_{in}$  dan  $C_{out}$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam gas umpan dan *sales gas* (%),  $K_{out}$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam *sweep gas* keluar (%),  $T_g$  adalah temperatur gas (K),  $S$  adalah luas kontak gas-cair pada permukaan membran (m<sup>2</sup>), dan  $n_{DEA}$  adalah jumlah mol pelarut DEA 30% berat.





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



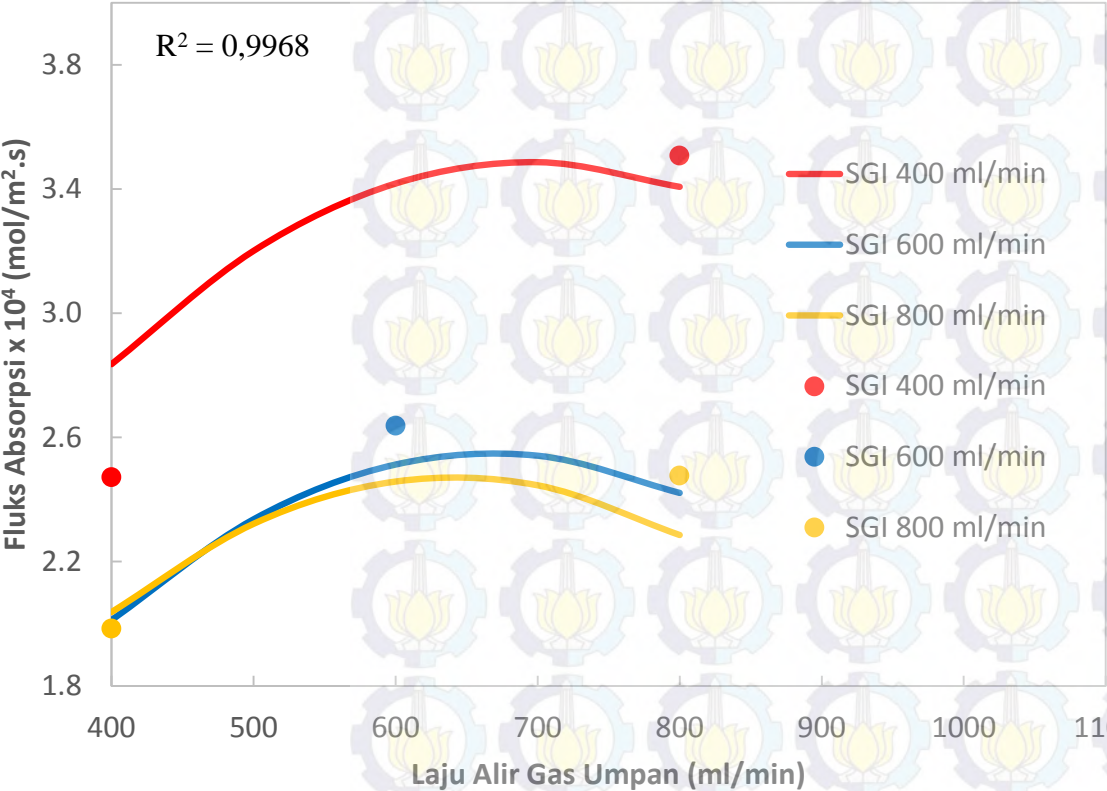
**ITS**  
chemical  
engineering

# HASIL PENELITIAN

---

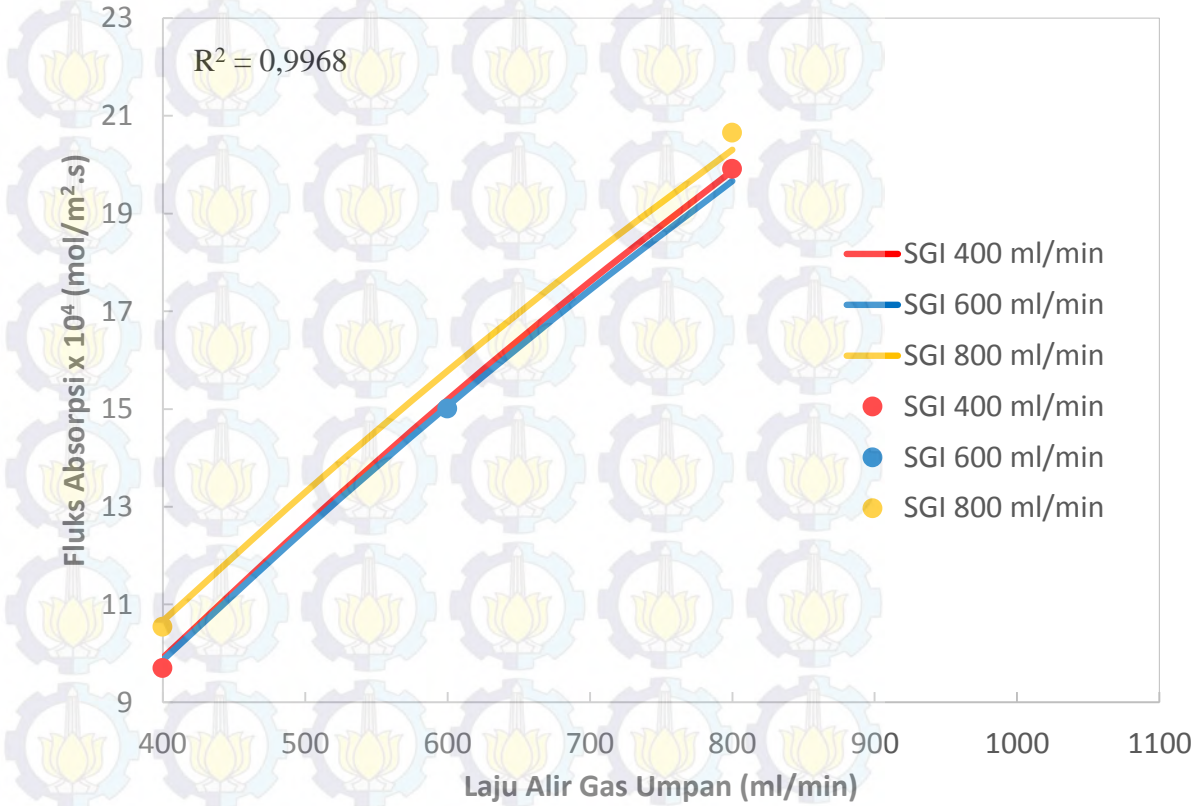


Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik



Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%

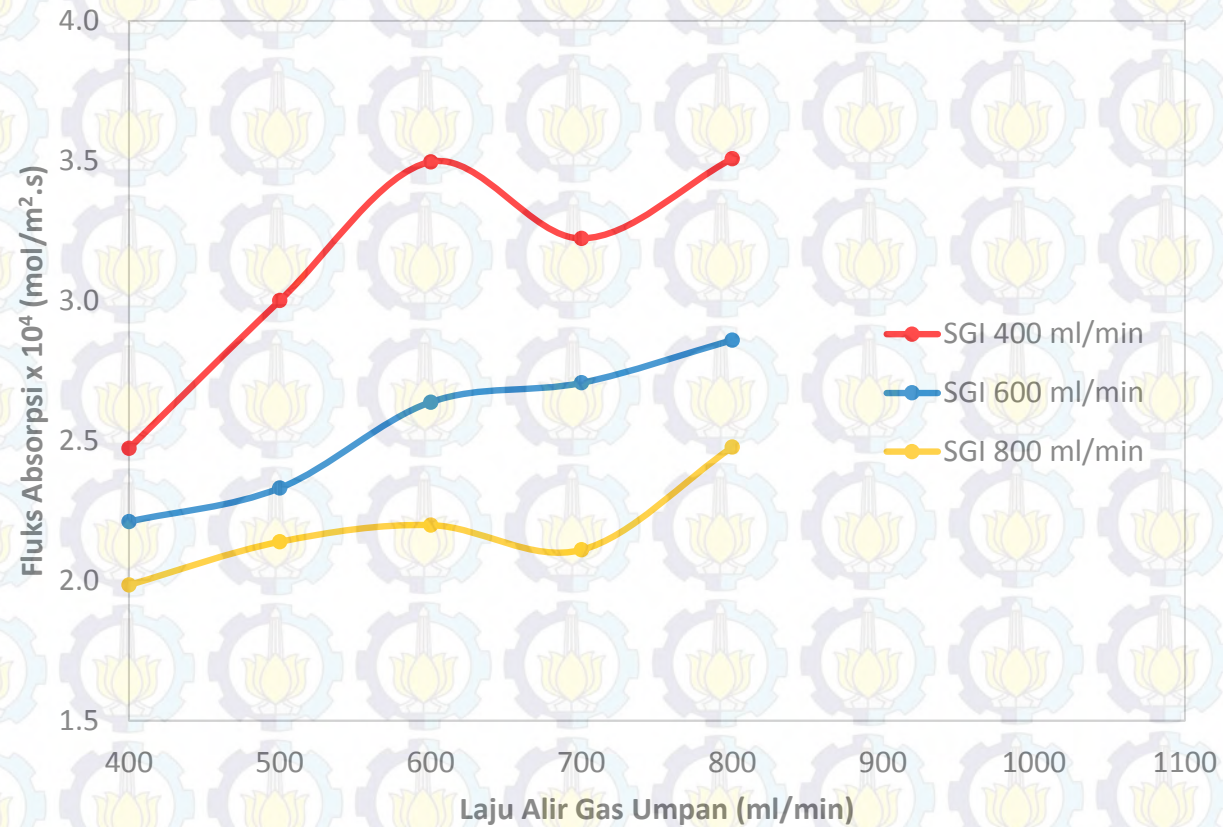
Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik



Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 99,9%



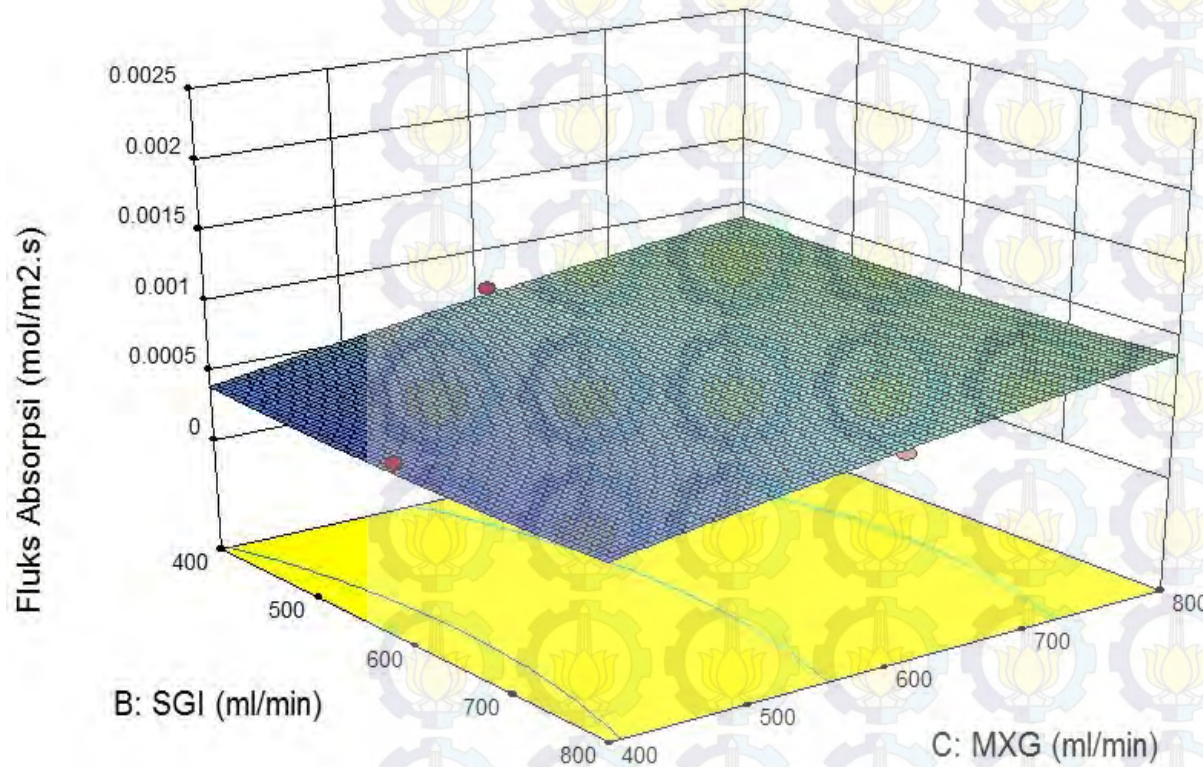
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO<sub>2</sub> pada  
Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) Hasil Percobaan Eksperimental**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**



## Response Surface Fluks Absorpsi



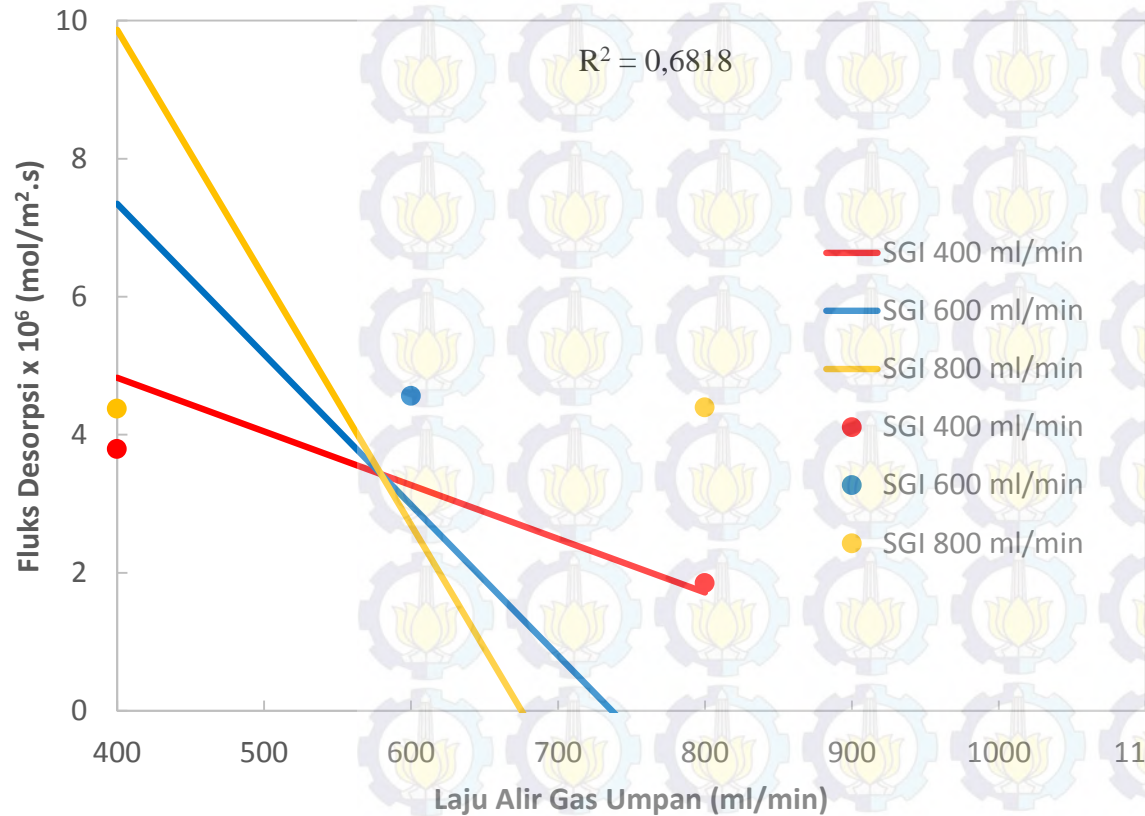
MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan

SGI (*Sweep Gas In*)

- Konsentrasi CO<sub>2</sub> semakin besar, fluks absorpsi semakin besar.
- Laju alir gas umpan semakin besar, fluks absorpsi semakin besar.
- Laju alir *sweep gas* tidak berpengaruh terhadap besar fluks absorpsi.

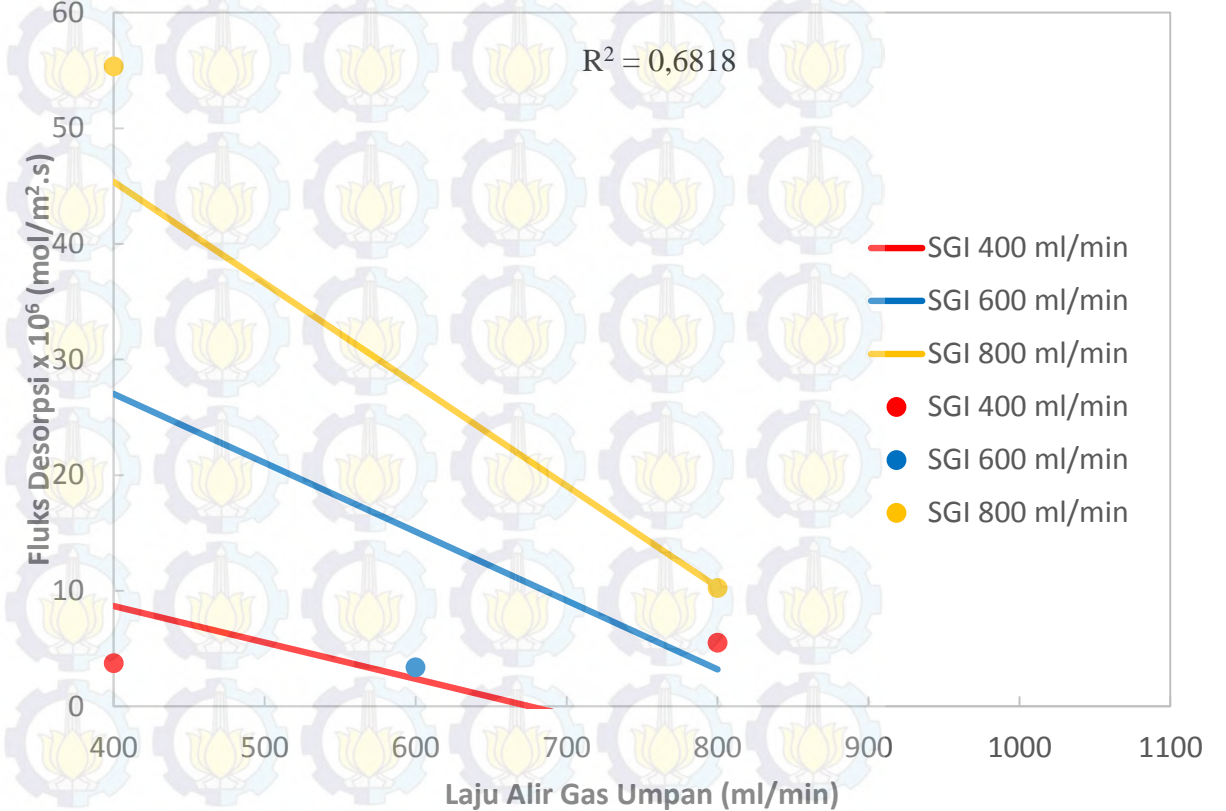


**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**

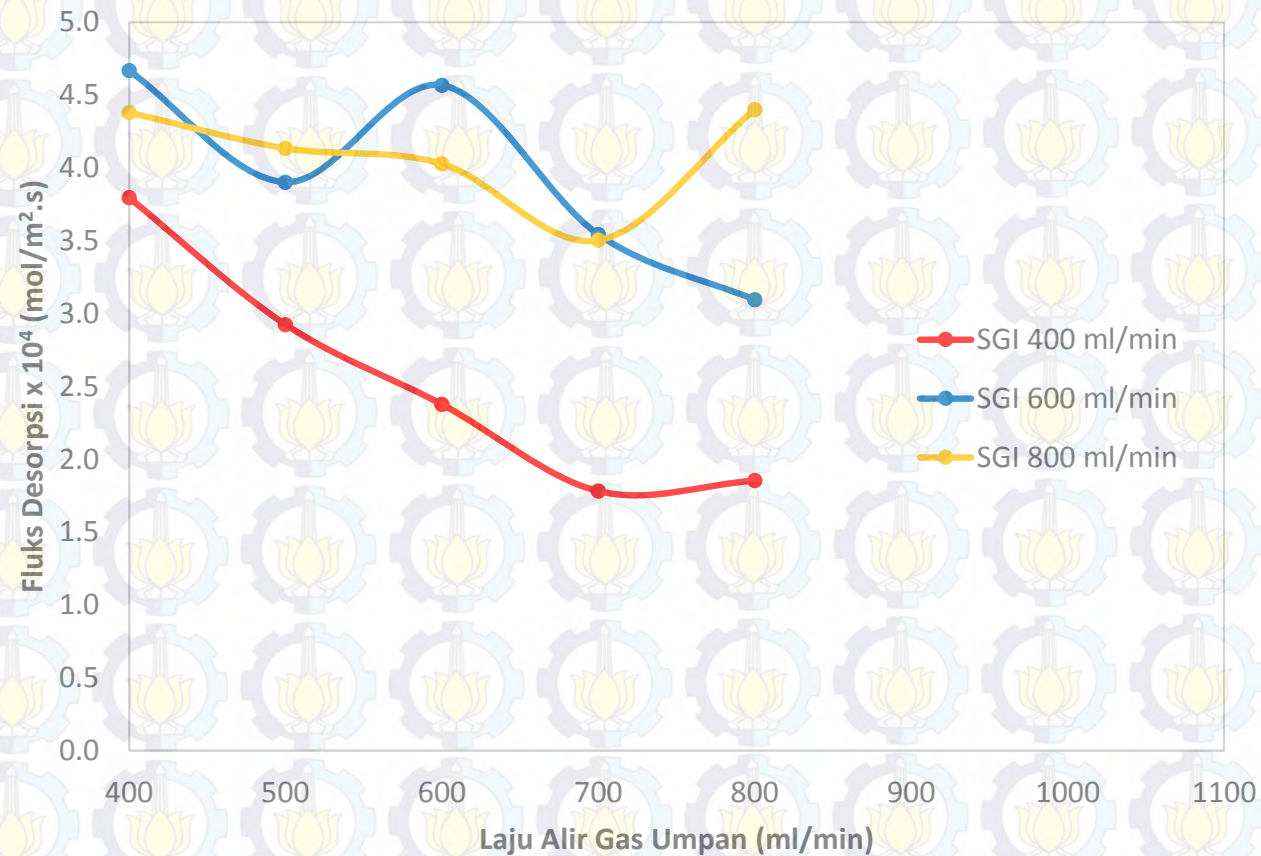
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 99,9%**



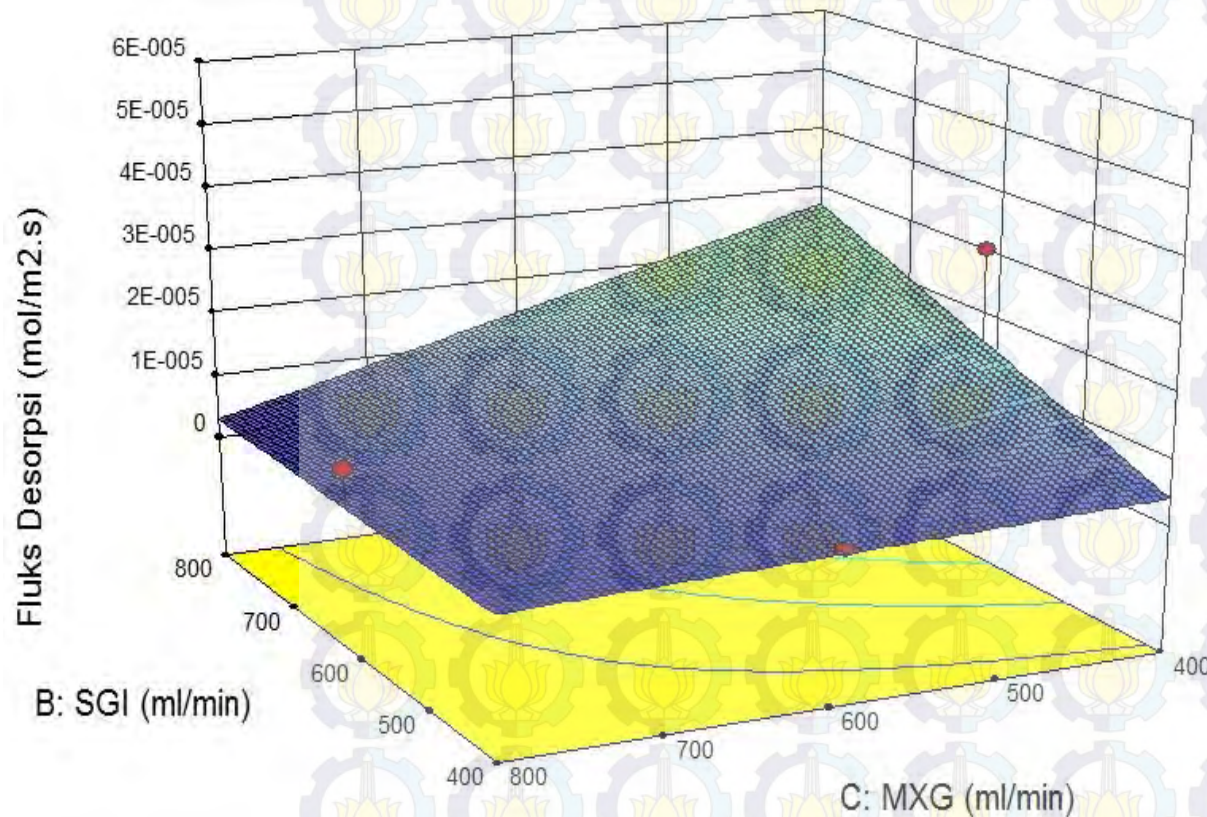
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO<sub>2</sub> pada  
Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) Hasil Percobaan Eksperimental**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**



## Response Surface Fluks Desorpsi



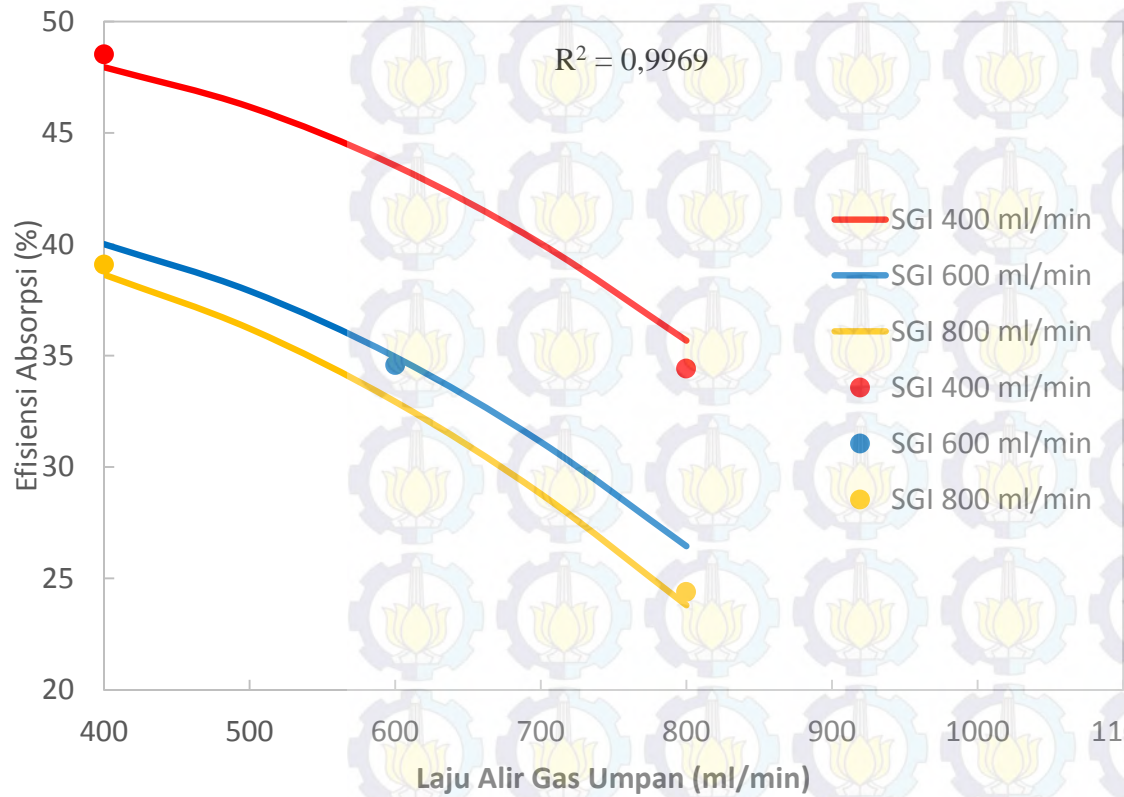
MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan

SGI (*Sweep Gas In*)

- Semakin besar konsentrasi gas CO<sub>2</sub>, semakin besar fluks desorpsi.
- Semakin besar laju alir gas umpan, semakin kecil fluks desorpsi.
- Semakin besar laju alir *sweep gas*, semakin besar fluks desorpsi.

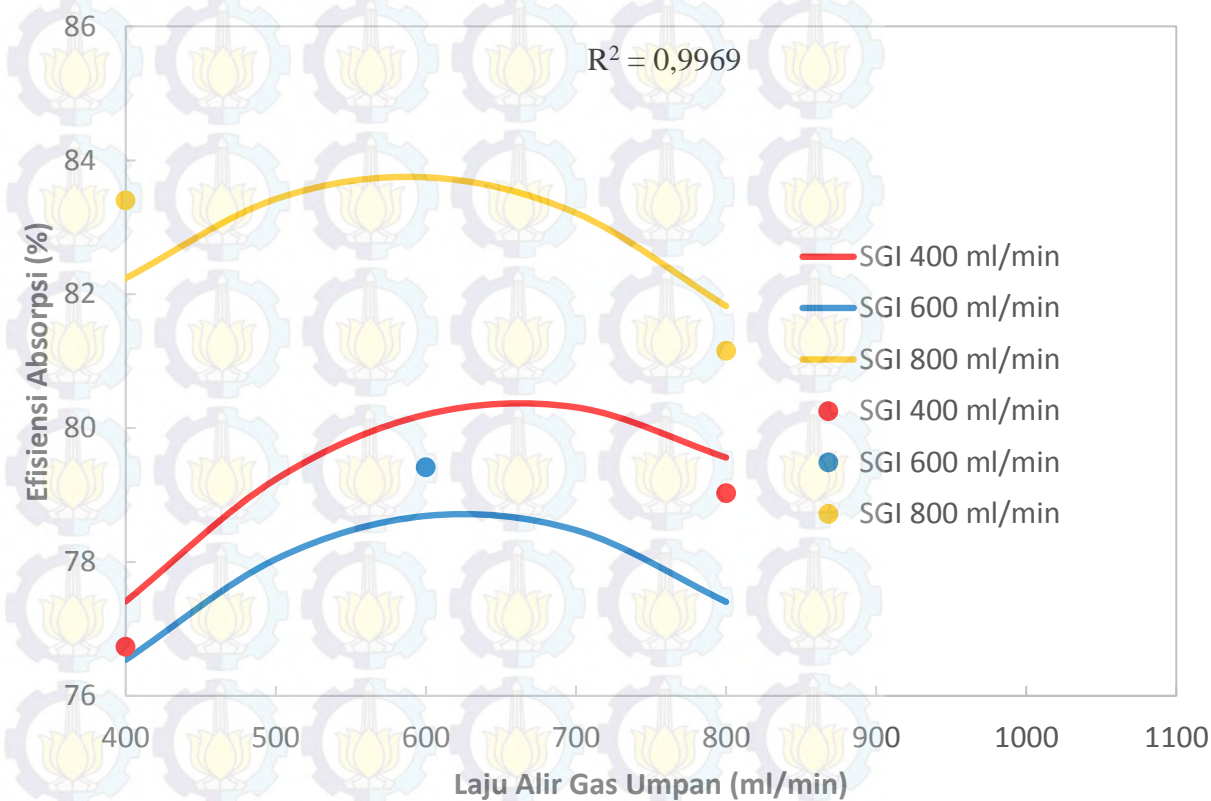


**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**

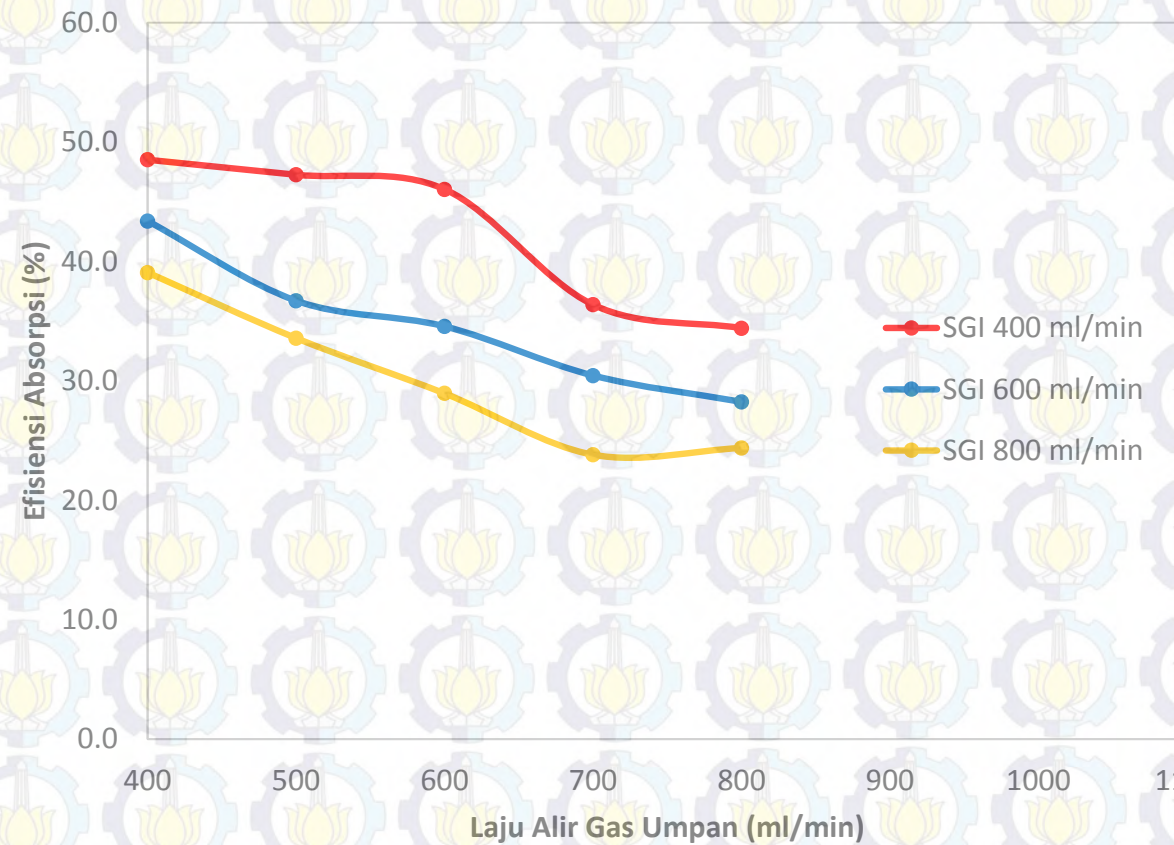
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 99,9%**



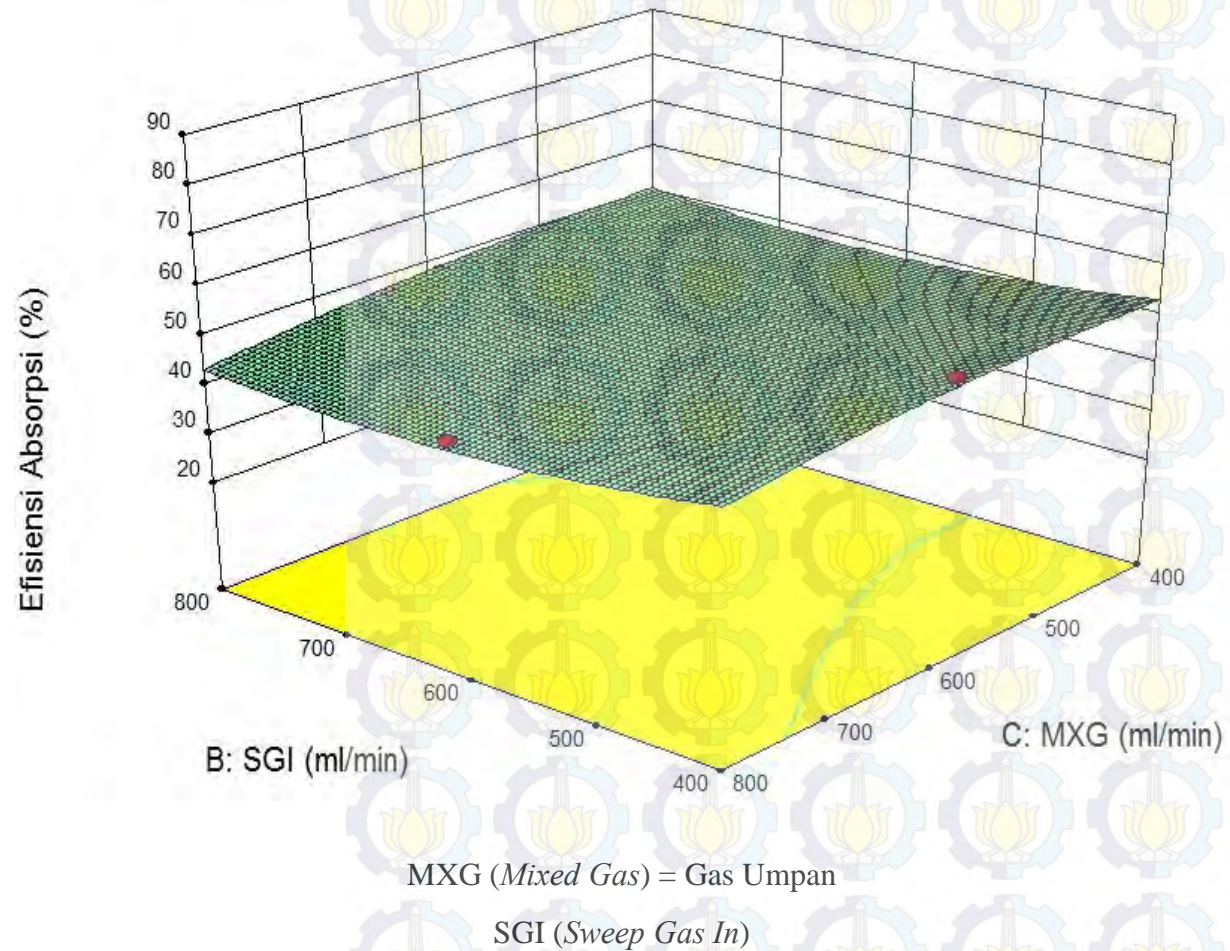
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) Hasil Percobaan Eksperimental**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**



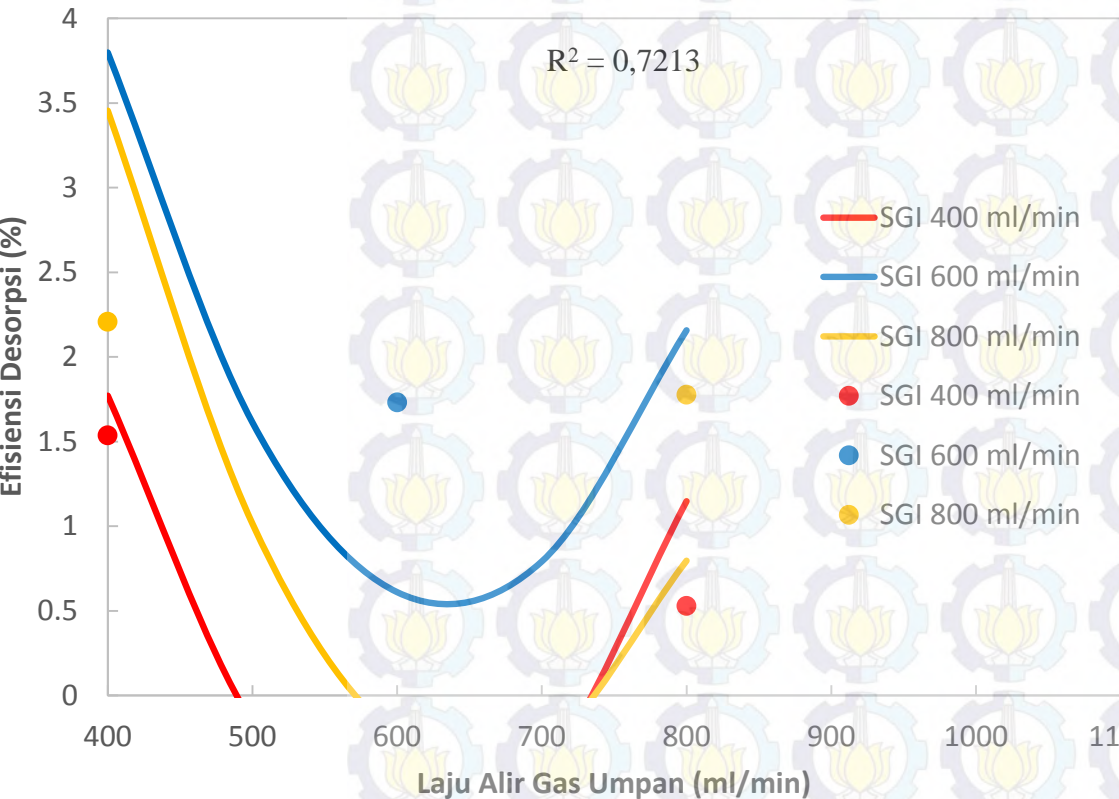
## *Response Surface* Efisiensi Absorpsi



- Semakin besar konsentrasi gas CO<sub>2</sub>, semakin besar efisiensi absorpsi.
- Semakin besar laju alir gas umpan, semakin rendah efisiensi absorpsi.
- Semakin besar laju alir *sweep gas*, efisiensi absorpsi cenderung semakin kecil.

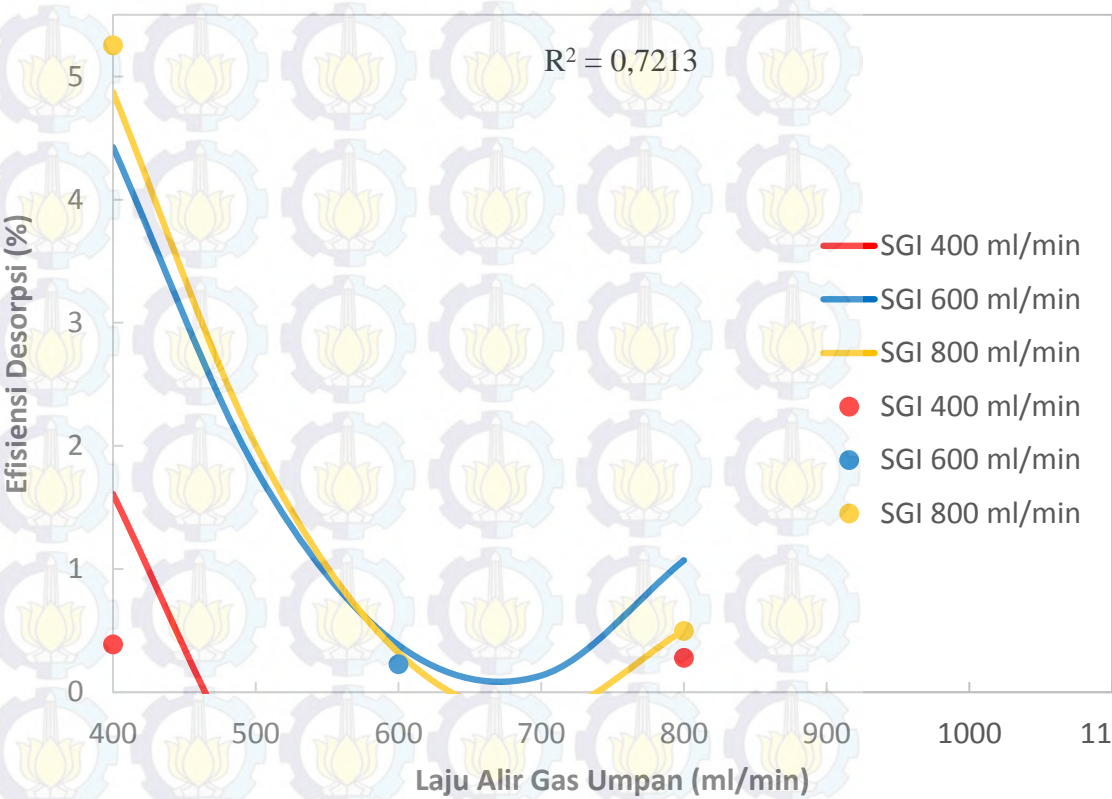


**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**

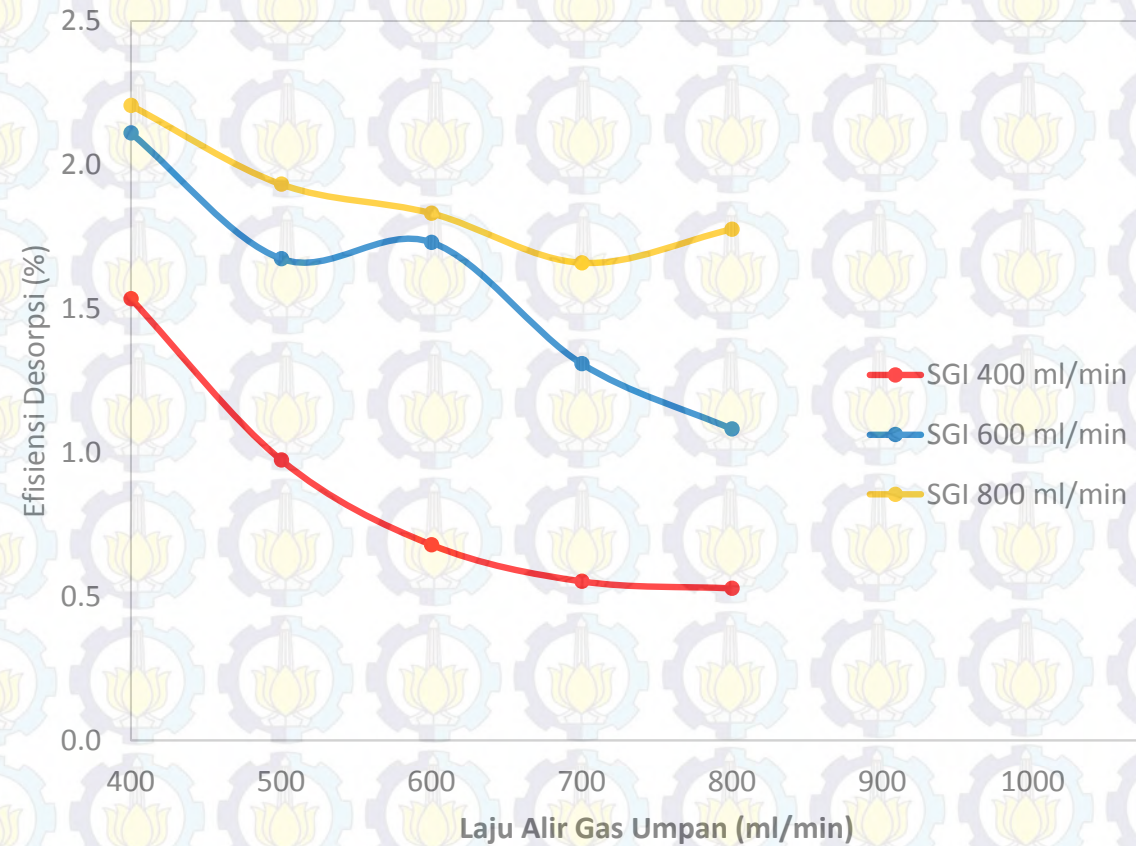
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 99,9%**



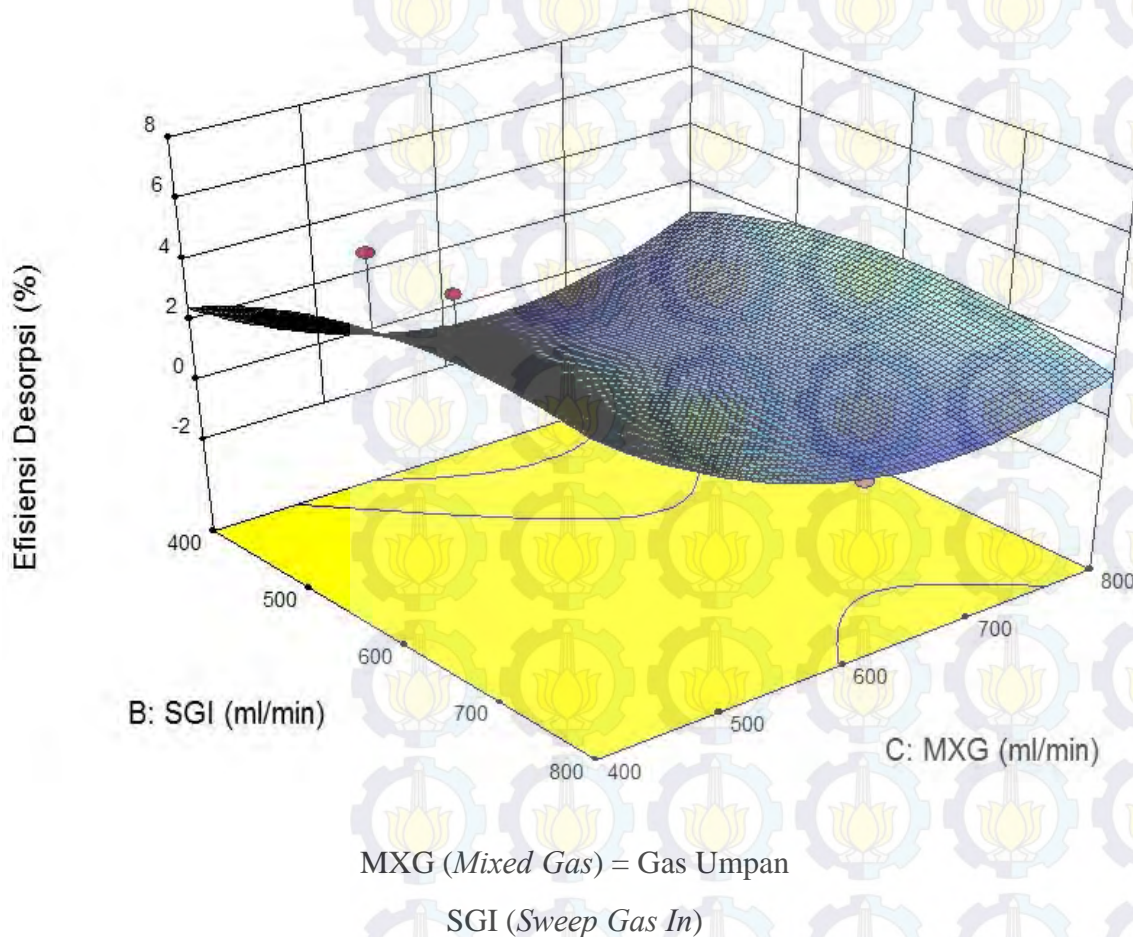
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO<sub>2</sub> pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) Hasil Percobaan Eksperimental**



**Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**



## Response Surface Efisiensi Desorpsi

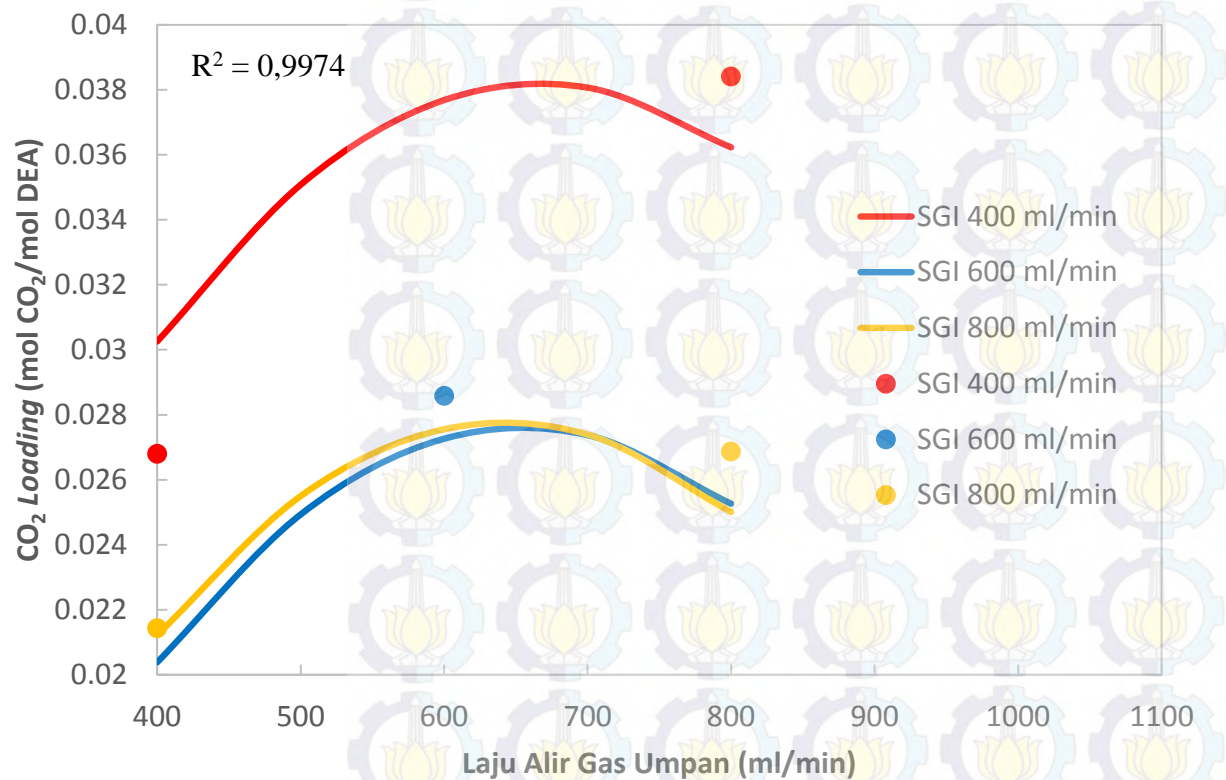


- Konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  cenderung tidak berpengaruh terhadap efisiensi desorpsi.
- Semakin besar laju alir gas  $\text{CO}_2$  (gas umpan), efisiensi desorpsi turun kemudian naik.
- Semakin besar laju alir *sweep gas*, efisiensi desorpsi naik kemudian turun.

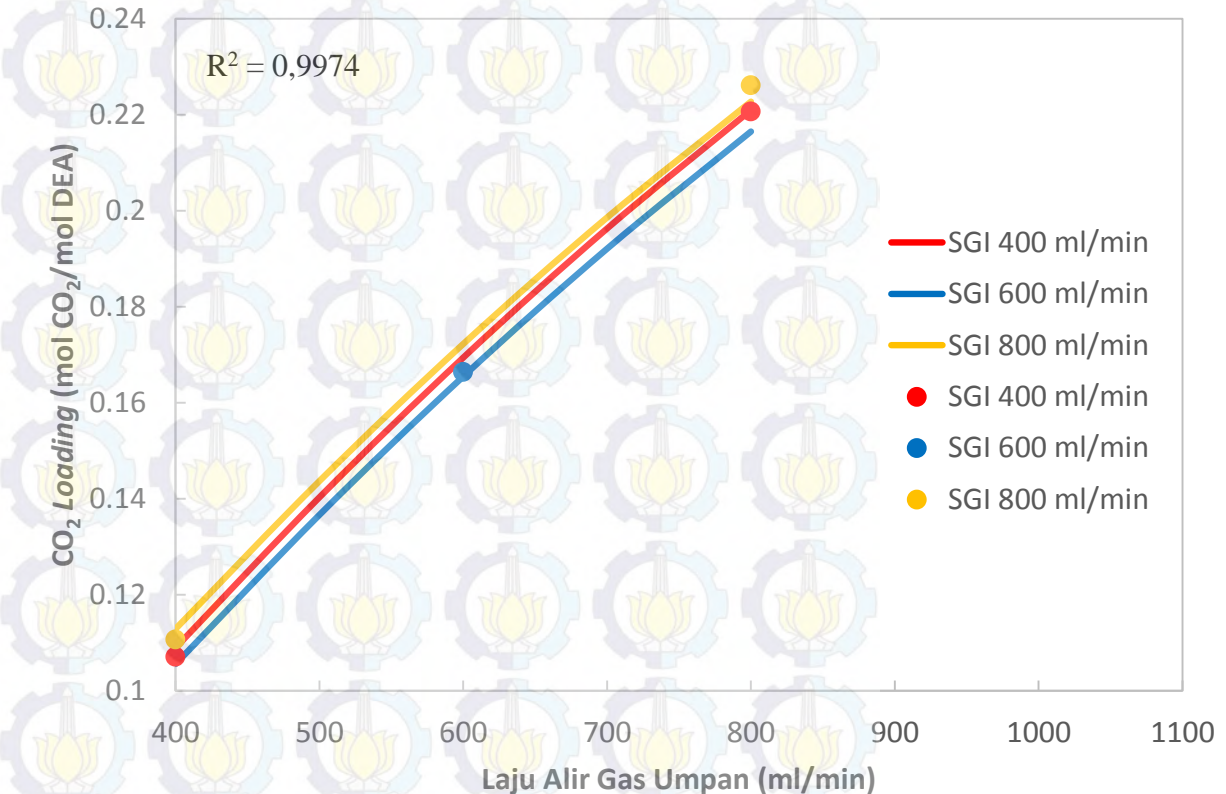


Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO<sub>2</sub> Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik

Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO<sub>2</sub> Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) dengan Pendekatan Statistik



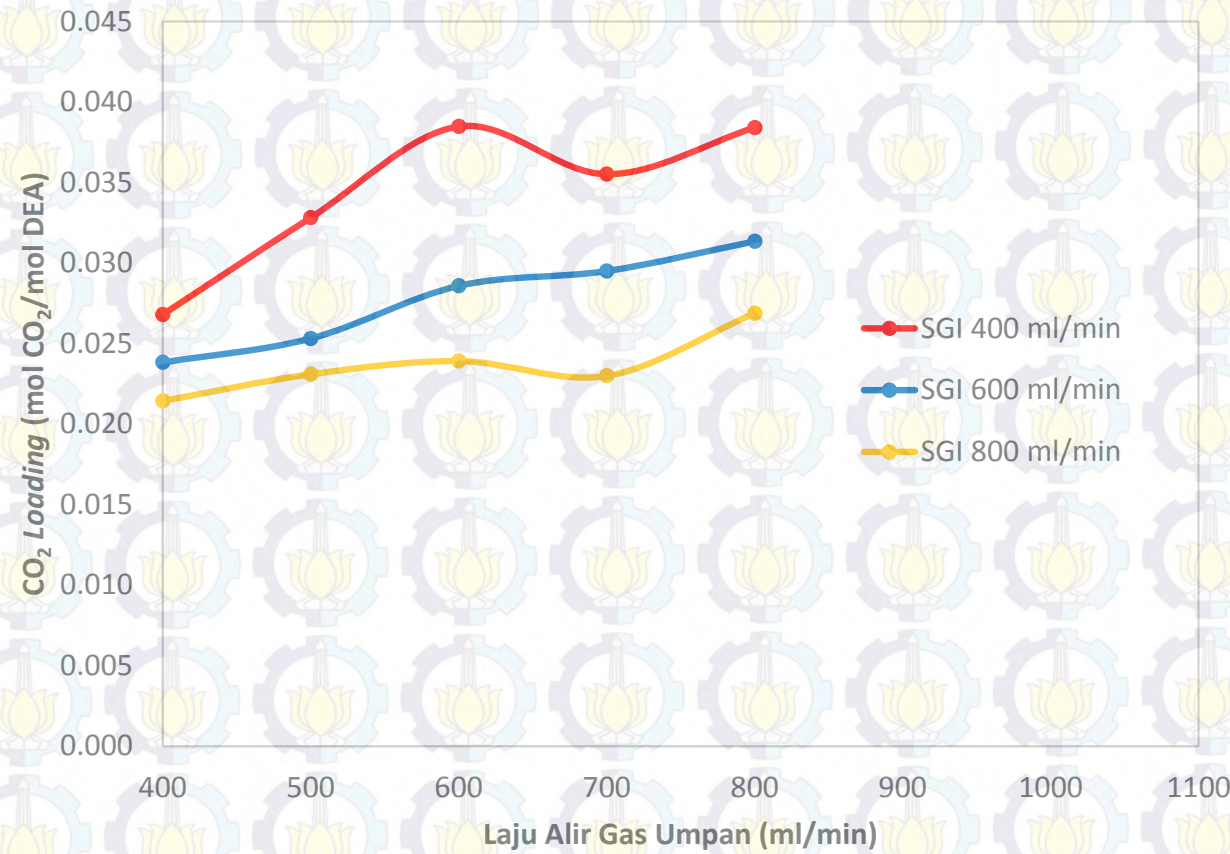
Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%



Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 99,9%



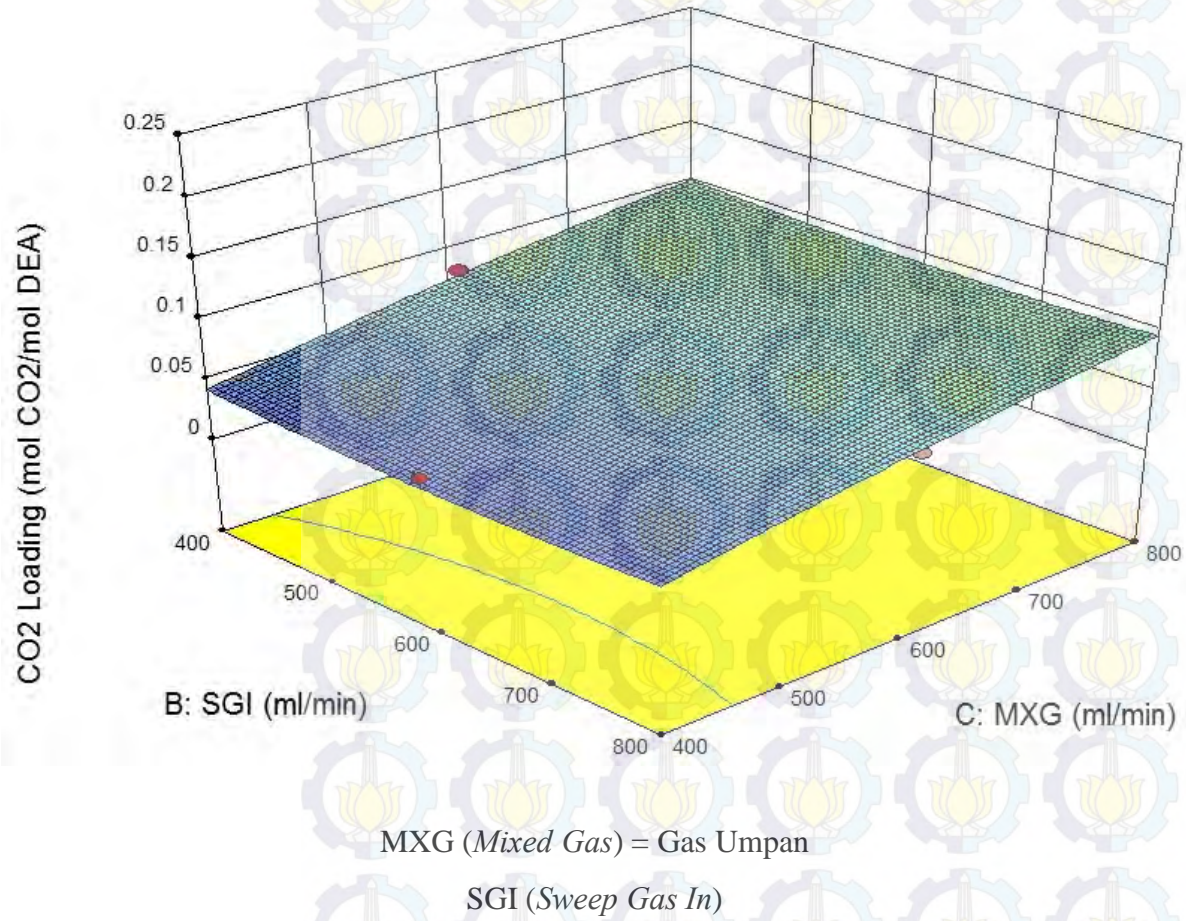
**Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap  $\text{CO}_2$  Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) Hasil Percobaan Eksperimental**



**Konsentrasi Gas  $\text{CO}_2$  40%**



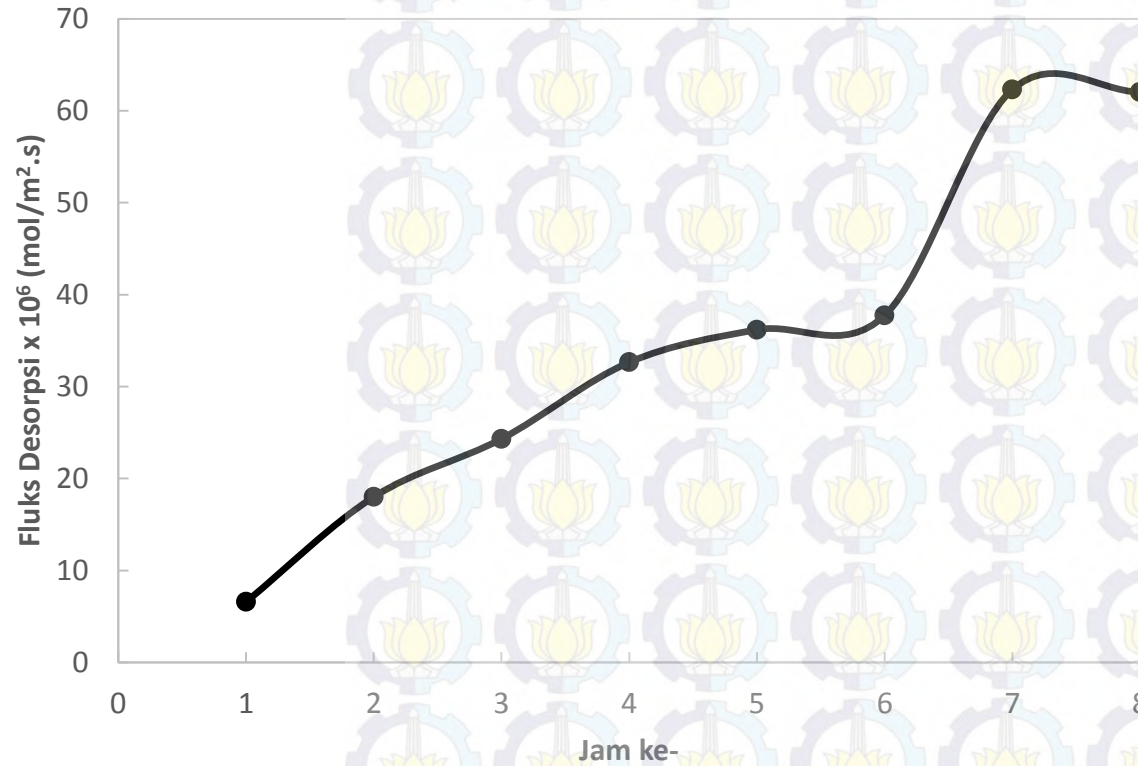
## *Response Surface CO<sub>2</sub> Loading*



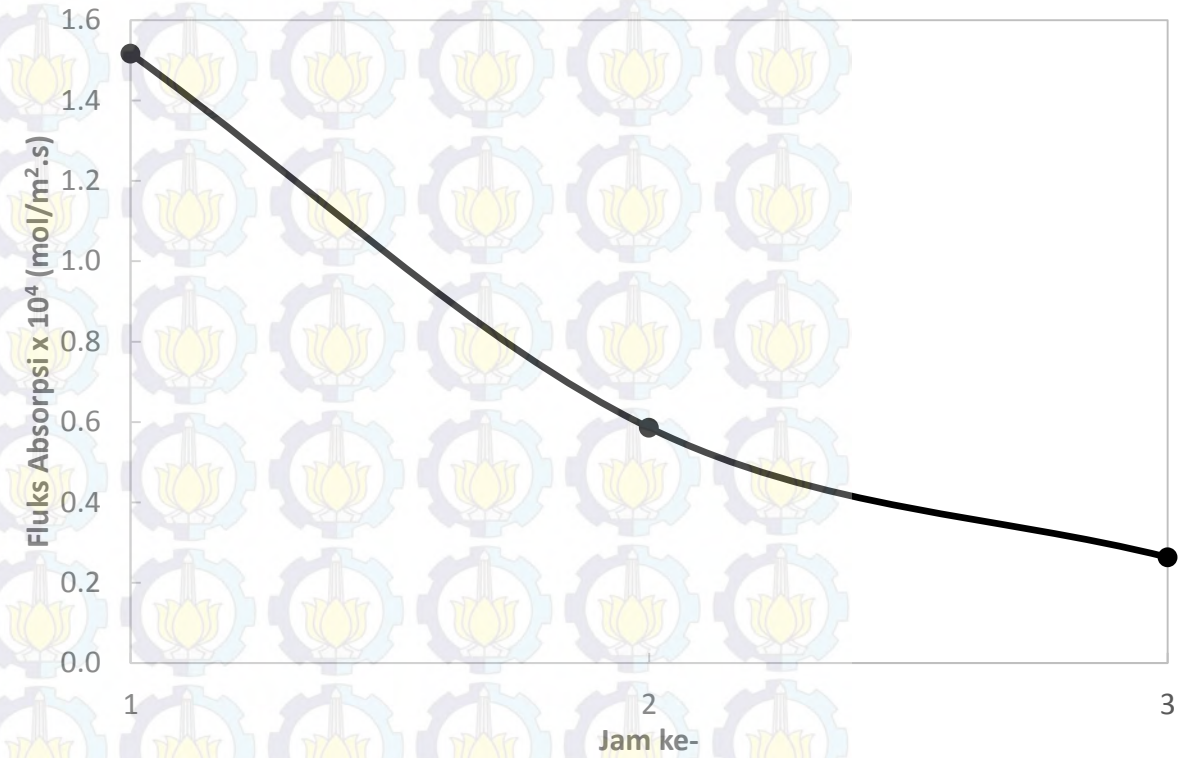
- Semakin besar konsentrasi gas CO<sub>2</sub>, semakin besar CO<sub>2</sub> loading.
- Semakin besar laju alir gas umpan, semakin besar CO<sub>2</sub> loading.
- Laju alir *sweep gas* tidak berpengaruh terhadap besar CO<sub>2</sub> loading.



**Fluks Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir Sweep Gas In 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**

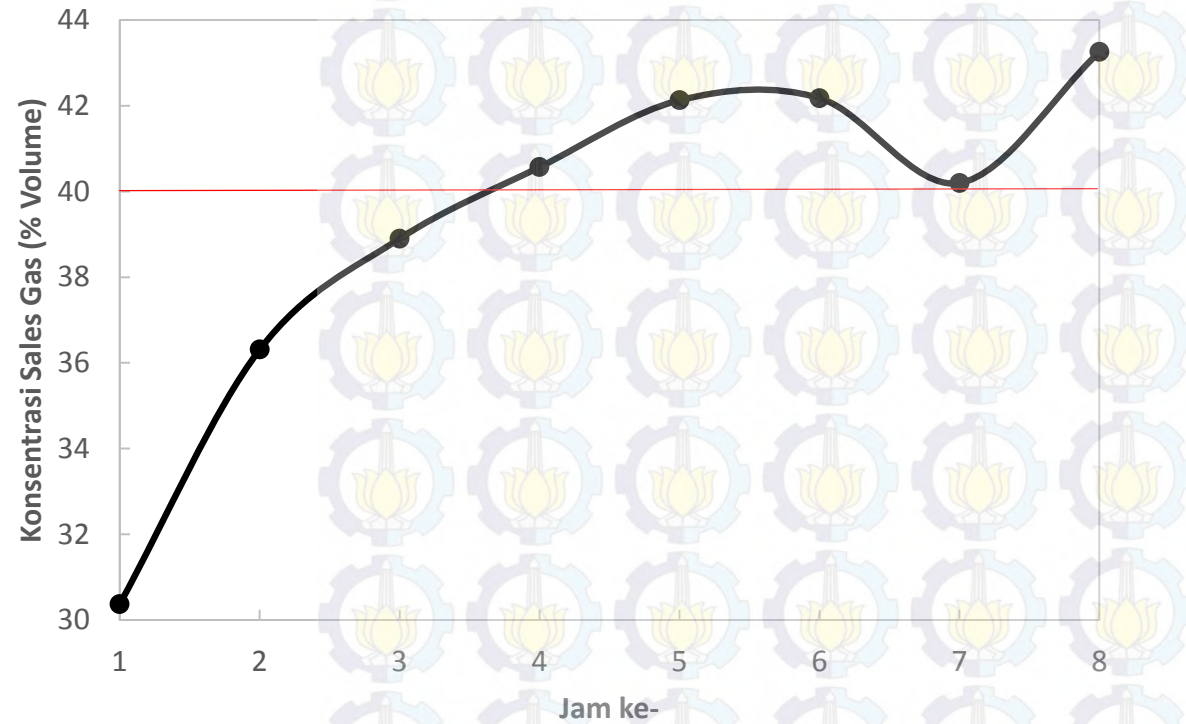


**Fluks Absorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir Sweep Gas In 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**

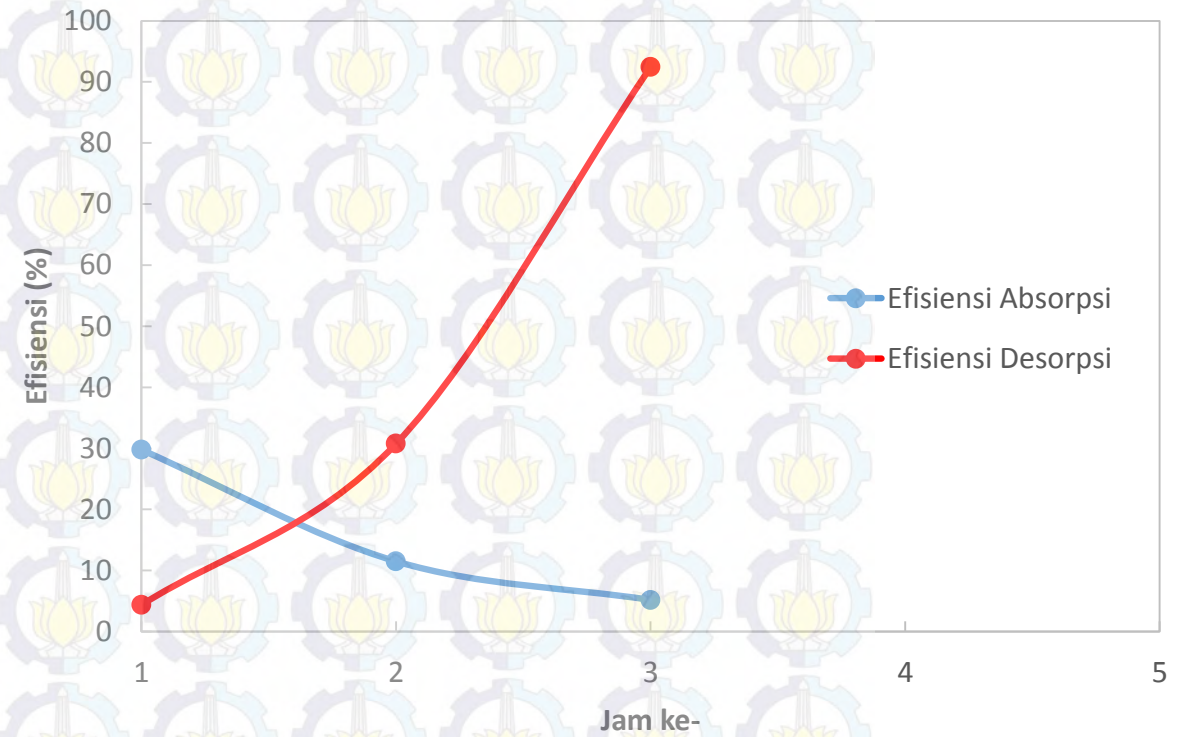




**Konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam Sales Gas Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir Sweep Gas In 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> Masuk 40%**



**Efisiensi Absorpsi dan Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir Sweep Gas In 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> 40%**





# Pembasahan pada Permukaan Membran



(a)



(b)

Hasil SEM Permukaan Membran PP (a) sebelum perendaman; (b) setelah perendaman



# KESIMPULAN

1. Fluks absorpsi tertinggi mencapai  $2,306 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$ .
  - fluks absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  semakin besar dan laju alir gas  $\text{CO}_2$  (gas umpan) semakin besar,
  - laju alir *sweep gas* cenderung tidak berpengaruh terhadap besar fluks absorpsi.
2. Fluks desorpsi tertinggi mencapai  $4,536 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$ . Fluks desorpsi semakin besar jika konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  semakin besar, laju alir gas  $\text{CO}_2$  (gas umpan) semakin kecil, dan laju alir *sweep gas* semakin besar.
3. Efisiensi absorpsi tertinggi mencapai 83,747%. Efisiensi absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  semakin besar, laju alir gas  $\text{CO}_2$  (gas umpan) semakin kecil, dan laju alir *sweep gas* semakin kecil.



# KESIMPULAN

4. Efisiensi desorpsi tertinggi 4,873%. Pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi desorpsi:
  - konsentrasi gas CO<sub>2</sub> cenderung tidak berpengaruh terhadap besar efisiensi desorpsi,
  - semakin besar laju alir gas CO<sub>2</sub> (gas umpan), efisiensi desorpsi turun kemudian naik,
  - semakin besar laju alir *sweep gas*, efisiensi desorpsi naik kemudian turun.
5. Uji kinerja:
  - Selama tiga jam pertama, fluks absorpsi semakin turun hingga  $2,63 \times 10^{-5}$  mol/m<sup>2</sup>.s. Lebih dari tiga jam, fungsi absorpsi dari membran sudah tidak bekerja dengan baik.
  - Fluks desorpsi semakin naik setiap jam uji kinerja hingga mencapai  $6,202 \times 10^{-5}$ .
  - Selama tiga jam pertama, efisiensi absorpsi semakin turun hingga 5,181%, sedangkan efisiensi desorpsi semakin naik hingga mencapai 92,437%. Lebih dari tiga jam, baik efisiensi absorpsi maupun efisiensi desorpsi sudah tidak berjalan dengan baik.
  - Secara keseluruhan, kontaktor membran mampu menjalankan fungsi absorpsi dan desorpsi selama tiga jam uji kinerja.





# TERIMA KASIH